



# OPTIMALIZACE TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ VE VZTAHU K ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI VSTŘIKOVANÉHO DÍLU Z PC

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství

*Studijní obor:* 2303T002 – Strojírenská technologie

*Autor práce:* **Bc. Petr Vejvoda**

*Vedoucí práce:* Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# PROCESS PARAMETERS OPTIMALIZATION IN RELATION TO DIMENSIONAL ACCURACY OF A POLYCARBONATE MOULD INJECT PART

Diploma thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2303T002 – Engineering Technology

*Author:* **Bc. Petr Vejvoda**  
*Supervisor:* Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



Tento list nahradíte originálem  
zadání.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

# Optimalizace technologických parametrů ve vztahu k rozměrové přesnosti vstřikovaného dílu z PC

## Process parameters optimization in relation to dimensional accuracy of a polycarbonate mould injected part

### Anotace

Diplomová práce se zabývá hodnocením a optimalizací vybraných technologických parametrů (teplotou temperačního media formy, dobou a velikostí dotlaku, dobou chlazení) ve vztahu k rozměrové a tvarové přesnosti polykarbonátového dílu z produkce firmy ABB Elektro Praga s.r.o. Hodnocení tvarové a rozměrové přesnosti dílů je provedeno optickým bezkontaktním systémem ATOS.

*Klíčová slova: vstřikování, smrštění, rozměrová a tvarová přesnost, polykarbonát, systém ATOS*

### Annotation

This diploma thesis deals with evaluation and optimization of chosen technological parameters (e.g. the temperature change of temperace medium mould, the change of the amount of molding press and the length of the cooling time) of shape and dimensional accuracy of the polycarbonated part produced in the ABB Elektro Praga s.r.o. company. The evaluation of the shape and dimensional accuracy is examined by means of an optical non - contact system ATOS.

Keywords: injection moulding, moulding shrinkage, dimensional and shape accuracy, polycarbonate, ATOS system

**Poděkování:**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a poskytnutí cenných rad při její tvorbě. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanovi Kozákovi, který mi poskytoval cenné rady při tvorbě diplomové práce. Také děkuji společnosti ABB a jejím zaměstnancům, která mi poskytla možnost zpracování diplomové práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval celé své rodině za psychickou a finanční podporu v průběhu celého studia a při psaní diplomové práce.

**OBSAH**

<b>Seznam použitých zkratek a symbolů .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1 Technologie vstřikování .....	- 10 -
2.1.1 Vstřikovací cyklus .....	- 11 -
2.1.2 Fyzikální popis procesu vstřikování .....	- 12 -
2.2 Rozměrová přesnost výstřiků z termoplastů .....	- 17 -
2.3 Smrštění termoplastů .....	- 18 -
2.3.1 Stanovení smrštění .....	- 19 -
2.3.2 Faktory ovlivňující smrštění .....	- 21 -
2.3.2.1 Vliv materiálu na smrštění .....	- 21 -
2.3.3 Vliv technologických parametrů vstřikování na rozměrovou přesnost .....	- 23 -
2.3.3.1 Vliv teploty formy .....	- 23 -
2.3.3.2 Vliv teploty taveniny .....	- 24 -
2.3.3.3 Vliv vstřikovací rychlosti .....	- 25 -
2.3.3.4 Vliv fáze dotlaku .....	- 25 -
2.3.3.5 Vliv doby chlazení .....	- 26 -
2.3.3.6 Vliv procesních parametrů .....	- 27 -
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>- 29 -</b>
3.1 Charakteristika výrobku .....	- 29 -
3.2 Výroba dílu – současný stav (standardní podmínky) .....	- 30 -
3.3 Měření rozměrové a tvarové přesnosti dílů .....	- 35 -
3.3.1 Příprava digitalizovaného objektu .....	- 36 -
3.3.2 Proces měření a možnosti vizualizace výsledků .....	- 36 -
3.4 Výběr rozměrů a pozic dílu pro vyhodnocení výsledků .....	- 39 -
3.4.1 Analýza získaných údajů digitalizovaných modelů dílu rámečku .....	- 41 -

3.4.2	Vliv změny teploty temperačního media (formy) na velikost tvarové odchyly v bodech P .....	- 42 -
3.4.3	Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku na velikost tvarové odchyly v bodech P .....	- 43 -
3.4.4	Vliv změny doby a velikosti dotlaku na velikost tvarové odchyly v bodech P .....	- 44 -
3.4.5	Vliv změny materiálu na velikost tvarové odchyly v bodech P .....	- 45 -
3.4.6	Vliv změny teploty temperačního media (formy) na velikost šířky dílu .....	- 46 -
3.4.7	Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku velikost šířky dílu ...	- 46 -
3.4.8	Vliv změny doby a velikosti dotlaku na velikost šířky dílu .....	- 47 -
3.4.9	Vliv změny materiálu na velikost šířky dílu .....	- 48 -
3.4.10	Vliv změny teploty temperačního media tvárníku na délkové rozměry dílu .....	- 48 -
3.4.11	Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku na délkové rozměry dílu .....	- 49 -
3.4.12	Vliv změny doby a velikosti dotlaku na délkové rozměry dílu .....	- 50 -
<b>4</b>	<b>DISKUZE NAMĚŘENÝCH HODNOT .....</b>	<b>- 50 -</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 56 -</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>- 58 -</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>- 60 -</b>



## Seznam použitých zkratek a symbolů

p	tlak	[MPa]
v	měrný objem	[m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
T	teplota	[°C]
T <sub>0</sub>	teplota okolí	[°C]
T <sub>VY</sub>	teplota vyhození výrobku z formy	[°C]
T <sub>0,1MPa</sub>	teplota při 0,1 Mpa	[°C]
S <sub>TP</sub>	celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny	[%]
S <sub>Tn</sub>	celkové smrštění ve směru kolmém se směrem toku taveniny	[%]
S <sub>Mp</sub>	výrobní smrštění ve směru rovnoběžném ke směru toku taveniny	[%]
S <sub>Mn</sub>	výrobní smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny	[%]
l <sub>1</sub>	délka zkušebního tělesa	[mm]
l <sub>C</sub>	délka tvarové dutiny mezi příslušnými referenčními body	[mm]
b <sub>C</sub>	šířka tvarové dutiny mezi příslušnými referenčními body	[mm]
b <sub>2</sub>	šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě	[mm]
l <sub>2</sub>	délka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě	[mm]
PBT	polybutylentereftalát	
PP	polypropylen	
PS	polystyren	
PE	polyethylen	
POM	polyoxymethylen	
PVC - P	měkčený polyvinylchlorid	
PMMA	polymethylmethakrylát	
ABS	akrylonitril-butadien-styren	
PC	polykarbonát	
PA 66	polyamid 66	
CCD	obrazový snímač (Charge-coupled device)	

## 1 ÚVOD

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci Technické univerzity v Liberci s jabloneckým závodem ABB Elektro Praga s.r.o., (dále jen ABB). ABB je jedním z největších výrobců domovního elektroinstalačního materiálu ve světě. V České republice má díky společnosti ABB více než 140 - ti letou tradici v oblasti výroby a prodeje spínačů, zásuvek a dalšího příslušenství pro domovní i průmyslové použití. Na tyto výrobky jsou kladeny určité noremní nároky, které jsou zákazníkem vyžadovány, zejména jejich rozměrová a tvarová přesnost, s ohledem na jejich další kompletaci do sestav. Pro úspěšnost výrobní společnosti v konkurenčním boji je snaha vyrábět své produkty v požadované kvalitě a schopnost reagovat na zákaznické potřeby. Požadavek pro dodržení kvality a jejich rychlou inspekci dnes zastávají v čím dál větší míře bezdotykové technologie nahrazující technologii dotykové.

V úvodu teoretické části je rozebrána technologie vstřikování, rozebrat problematiku smršťení plastů a následně technologických parametrů, které ovlivňují toto smršťení. Protože smršťení není materiálovou konstantou, ale je ovlivněno mnohými technologickými faktory, je tomuto tématu věnována větší pozornost. Tato práce se zabývá závislostí celkového smršťení (rozměrové a tvarové přesnosti) na technologických parametrech.

Jedním z cílů této práce je snaha posoudit, jaké parametry mají největší vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost dílu, kde je primárně sledováno odchýlení dílu od ideální roviny za současného sledování zhoršení či zlepšení této odchylky od standardně vyráběného dílu. Vstřikovací parametry by měly být voleny účelově, aby nedošlo k jiným vadám, protože se navzájem mohou ovlivňovat. S ohledem na tuto problematiku jsou využity zkušenosti technologů a seřizovačů z praxe ve společnosti ABB. Jedním z pravděpodobně největších vlivů bude na základě poznatků z teoretické části fáze dotlaku. Samotné deformace a míry rozměrových změn vybraných budou měřeny a vyhodnocovány pomocí bezkontaktní metody ATOS a na základě těchto vyhodnocených výsledků navrhnout kroky, které by mohly vést k zlepšení kvality dílu.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Kvalita i rozměrová přesnost vstřikovaných parametrů je ovlivněna řadou faktorů, které souvisí s volbou materiálu, technologickými podmínkami vstřikování, geometrií výrobku, ale také s konstrukcí stroje i nástroje. Při správné volbě materiálu, stroje, geometrii výrobku a konstrukce nástroje je důležité správné nastavení technologických parametrů, které společně s výše uvedeným významně ovlivňují kvalitu výstřiku, zejména jeho rozměrovou přesnost. V souladu s řešenou problematikou je teoretická část diplomové práce zaměřena na rozbor technologie vstřikování, smrštění termoplastů a vlivu technologických parametrů na rozměrovou a tvarovou přesnost výstřiku.

### 2.1 Technologie vstřikování

Technologie vstřikování je diskontinuální cyklický proces, kdy se materiál v plastickém stavu vstřikuje vysokou rychlostí do temperované uzavřené kovové formy. Dutina formy má tvar výrobku, ve které tavenina ztuhne v konečný výlisek. Ten je vyjmut z dutiny formy a celý proces se opakuje. Technologický sled operací je možné rozdělit do několika základních fází. První je obvykle fáze přípravná, která zahrnuje převzetí materiálu, dopravu, kontrolu a jeho úpravu. Úpravou rozumíme obvykle sušení, které závisí na druhu polymeru a na tom jak je polymer náchylný k vlhkosti (např. velmi navlhavý polyamid je nutné vždy sušit). Sušení se provádí většinou v sušičkách s cirkulací horkého vzduchu. Dále se materiál pneumaticky dopravuje do násypky stroje ze zásobníků, kde jej obsluha stroje doplňuje ručně. Z násypky je granulát odebírán otáčením šneku a dopravován do tavicí komory, kde za současného účinku tření a topení vzniká tavenina. Tavenina je vstříknuta do dutiny formy, která jí vyplňuje a zaujímá její tvar. Následná tlaková fáze zabraňuje smrštění plastu a rozměrovým změnám výrobku. Plast předává formě teplo a tuhne ve finální výrobek. Dále dojde k otevření formy a výrobky jsou odebrány, kontrolovány a baleny nebo se posílají k dalšímu zpracování a montáži. I když je tato metoda zpracování náročná na počáteční investici, mezi výhody vstřikování patří:

- krátký čas výrobního cyklu,
- rozměrově a tvarově přesné výrobky,
- opakovatelnost a automatizace procesu,
- vysoká reprodukovatelnost mechanických a fyzikálních vlastností.

Vstřikovací cyklus se vyznačuje složitými procesy, na kterých se podílí vstřikovací forma, vstřikovací stroj a druh materiálu. Proto je důležité znát působení fyzikálních dějů v materiálu výrobku během a i po vstřikování [1].

### 2.1.1 Vstřikovací cyklus

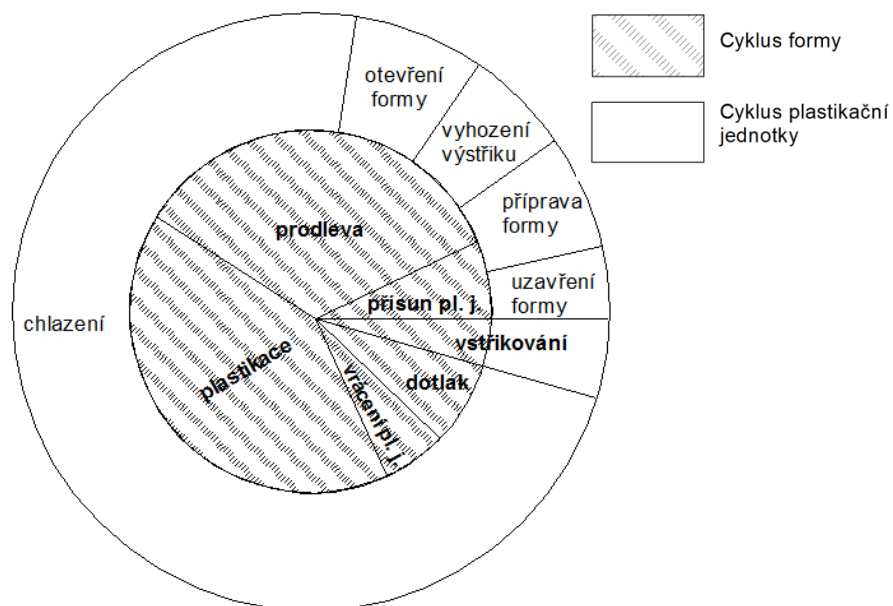
Procesem vstřikování se zhotovují výstřiky, které vznikají při určitém sledu přesně jdoucích operací za sebou (viz obr. 2.1). Tento postup operací se nazývá vstřikovací cyklus, na jehož počátku je vstřikovací forma otevřena.

Prvním impulsem počátku cyklu je uzavření formy a zamknutí formy. Dále šnek koná axiální pohyb směrem dopředu a po přisunutí vstřikovací jednotky k tavicí komoře a tavenina je vstříknuta do dutiny formy. Během plnění dutiny formy vzroste vnitřní tlak na maximum a plnění je ukončeno. Zde začíná chladnutí a tuhnutí až do samotného otevření formy. Během chladnutí se plast uvnitř formy smršťuje, a proto je zajištěno doplnění materiálu pomocí tzv. dotlaku. Po ukončení dotlaku začíná plastikace nové dávky, kdy se šnek otáčí, ustupuje dozadu a zároveň nabírá novou dávku a tlačí jí před čelo šneku. Po ukončení plastikace může docházet k odsunutí tavicí komory od formy (jelikož technologie vstřikování dnes dosahuje vysoké úrovně, není to pravidlem). Dále výrobek chladne při působení zbytkového tlaku, který zabraňuje vzniku vad, jako jsou propadliny nebo vnitřní napětí ve výrobku. Nakonec se forma otevře a dojde k vyhození výstřiku. Takto je celý cyklus opakován.

Ve většině případů je dnes provoz strojů ovládán poloautomaticky nebo automaticky. Je tak dosaženo samočinného dodržení nastavených parametrů na stroji kam patří například:

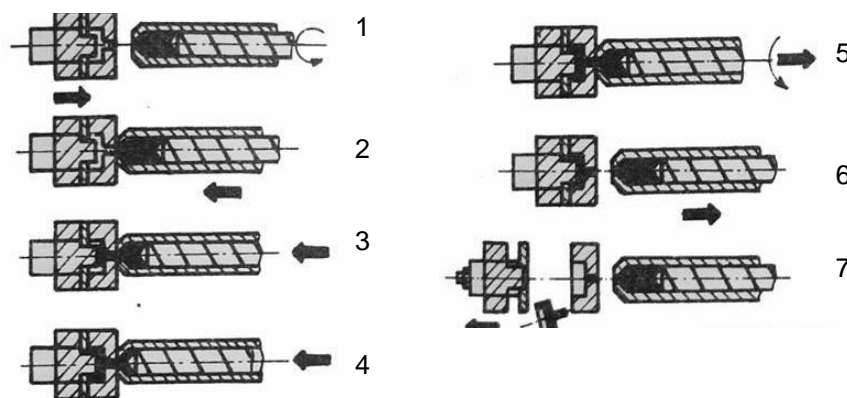
- teplota vstřikovaného materiálu,
- průběh a profil dotlaku,
- velikost vstřikovacího tlaku,
- rychlost vstřikování,
- časové rozložení vstřikovacího cyklu.

Teplota obou částí formy a průběh chlazení je obvykle řešena pomocí externí temperační jednotky [1,2].



Obr. 2.1 Fáze vstřikovacího cyklu [3]

Jednotlivé fáze vstřikování jsou pro lepší názornost jednoduše zobrazeny pomocí schématu na obr. 2.2.

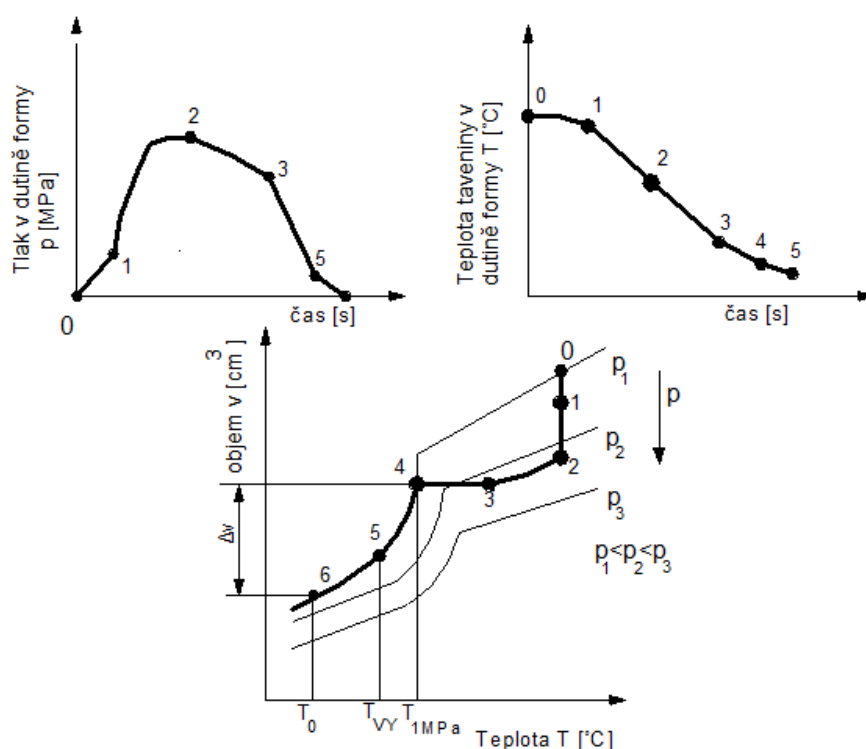


Obr. 2.2 Průběh vstřikování [4]

1 - uzavření formy, 2 - přisunutí vstřikovací jednotky, 3 – plnění dutiny formy, 4 – dotlačování, 5 – plastifikace, 6 – odsunutí plastikační jednotky, 7 otevření formy

### 2.1.2 Fyzikální popis procesu vstřikování

Pro lepší názornost popisu procesu jsou využity diagramy p-v-T: tlak - měrný objem - teplota, diagram T-t: teplota- čas a diagram p- t: tlak – čas (viz obr. 2.3)



Obr. 2.3 Znázornění změny tlaku, objemu a teploty taveniny při vstřikování termoplastů

**A:** celkové smrštění, **B:** výrobní objemové smrštění,  $T_{vy}$ : teplota vyhození z formy,  $T_o$ : teplota okolí [5]

V těchto diagramech je zachyceno 6 fází vstřikovacího procesu

**0 - 1: objemové naplnění dutiny formy- izotermická fáze**

V tomto úseku dochází k objemovému zaplnění dutiny formy taveninou, vstřikovací tlak stoupá a teplota materiálu je beze změny.

**1 - 2 : komprese taveniny**

Tavenina je dále při působícím tlaku doplňována do dutiny formy a vstřikovací tlak stoupá k maximální hodnotě a zároveň dochází k intenzivnímu chlazení taveniny.

**2 - 3: dotlak**

Zde probíhá intenzivní pokles teploty taveniny a pokles vstřikovacího tlaku. Výrobek se začíná smršťovat. Toto smrštění je zčásti kompenzováno stálým doplňováním taveniny.

**3 - 4: pokles tlaku - isochorický přechod na  $T_{1MPa}$**

Vtokové ústí tuhne a je znemožněno doplňování taveniny a vyrovnání smrštění. Tlak v dutině formy klesá na úroveň atmosférického tlaku.

**4 - 5: chlazení bez tlaku - izobarické chlazení**

Výrobek je ochlazován při konstantním tlaku na teplotu vyhazování a je vyhozen

z formy při  $T_{vy}$

### **5 - 6: chlazení mimo formu - izobarické chlazení**

Výstřik chladne mimo formu na teplotu okolí

Proces vstřikování je postupně charakterizován jednotlivými fázemi: [5]

- plastikace materiálu,
- vstříknutí taveniny do dutiny formy,
- fáze dotlaku,
- chladnutí výstřiku,
- vyhození z formy.

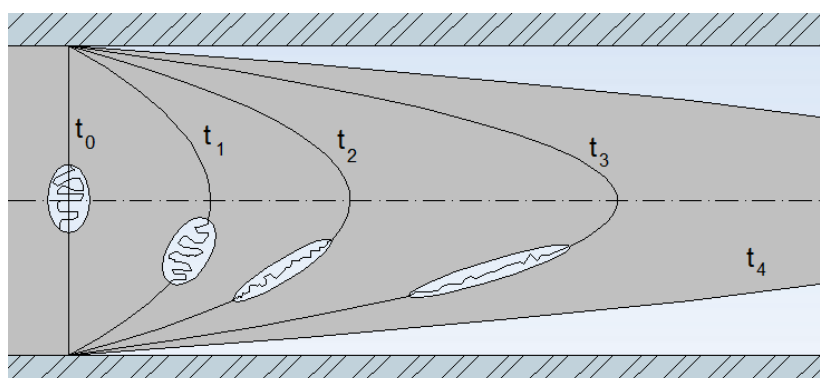
#### **Plastikace materiálu:**

Úkolem plastikace je získat z granulátu co nejlepší homogenní taveninu. Na počátku této fáze je granulát plastikován v tavicí komoře, šnek koná pohyb vzad a zároveň se otáčí. Při pohybu vzad překonává šnek zpětný tlak, přičemž velikost tohoto tlaku může ovlivnit dobu plastikace. Při tomto pohybu se dávkuje tavenina před čelo šneku. Abychom získali taveninu, je ohřev a tavení zajištěno pomocí topných válců a třením materiálu o stěny válce při jeho hnětení. S tím je spojena regulace správného nastavení tepla v jednotlivých topných pásmech topného válce. Proces plastikace je ukončen v bodě 0 (viz obr. 2.3) a je to stav, kdy je zhomogenizovaná tavenina připravena k vstříknutí do dutiny formy. Při nedodržení správné homogenity taveniny se na konečném výrobku mohou vyskytovat povrchové vady, jako např. studený spoj, rozdíly v lesku atd. Homogenitu taveniny je možné ovlivnit konstrukcí šneku, otáčkami šneku nebo zpětným tlakem [1,6,7].

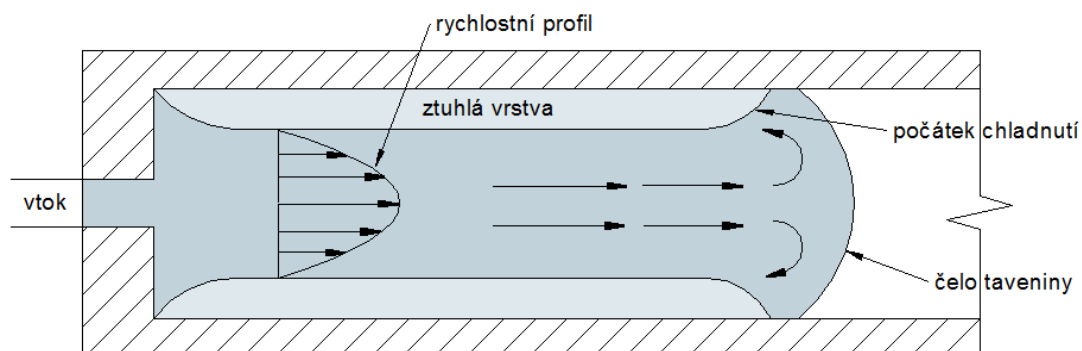
#### **Vstříknutí taveniny do dutiny formy:**

Úkolem této fáze je vyplnění dutiny taveninou plastu. Podle obr. 2.3 je tento úsek popsán pomocí křivky 0 – 2. Jak už bylo napsáno v kapitole 2.1.1 plnění se děje pomocí šneku konajícího axiální pohyb. Vyplnění dutiny formy musí být co nejrychlejší, ale zároveň takové, aby k plnění docházelo postupně, nikoliv volným proudem. Tok taveniny je charakteristický přítomností smykových sil, které působí na makromolekuly plastu, jež jsou jejich základním strukturním útvarem. Makromolekuly zaujímají v roztaveném stavu tvar sbaleného klubíčka, pokud jsou vystaveny účinku smykových sil, dochází k jejich rozbalování a uspořádání ve směru toku taveniny (viz obr. 2.4). Při prvním styku taveniny s dutinou formy dochází k přenosu tepla a začíná její tuhnutí. Na povrchu stěny

formy vzniká ztuhlá vrstva plastu, která plastické jádro izoluje. Tento děj je zřetelný na obr. 2.5. Tím jak tavenina postupně tuhne, vytváří se jednotlivé vrstvy ve výstřiku, v nichž může dojít k změnám viskozity a k nerovnoměrné orientaci makromolekul, která má za následek anizotropii vlastního dílu. To je způsobeno vlivem rozdílných smykových rychlostí, rozdílných teplot a rozdílných rychlostí toku taveniny. Průběh plnění dutiny formy taveninou platí je řízen teplotou taveniny, teplotou formy, vstřikovacím tlakem a vstřikovací rychlostí. Vstřikovací rychlost se nastavuje podle složitosti dílu a požadavků na jakost. Velké změny rychlosti tlaku, viskozity a teploty taveniny při plnění dutiny formy vedou k nehomogenitě, nerovnoměrnosti struktury a orientaci výstřiku.



Obr. 2.4 Orientace makromolekul polymeru ve směru toku taveniny v závislosti na vstřikovací rychlosti [8]



Obr. 2.5 Laminární tok taveniny [9]

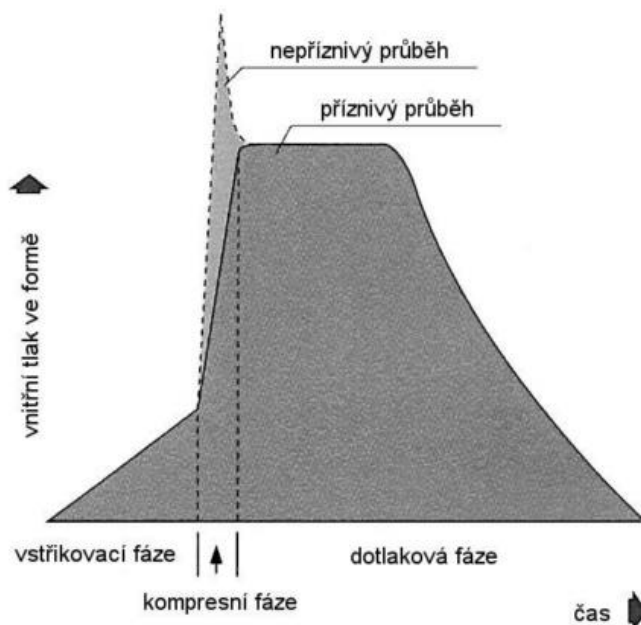
Po naplnění formy dochází k stlačení taveniny a k maximálnímu nárůstu tlaku a poklesu vstřikovací rychlosti s následným přepnutím na dotlak. Čemu je nutné se vyvarovat, je tzv. dýchnutí formy, kdy se může forma pootevřít v důsledku malé uzavírací síly a velkého tlaku. To může nastat při pozdním přepnutí na dotlak a vzniku tzv. tlakové špičky (viz obr. 2.6), při které může dojít k velkému namáhání formy, vzniku vnitřního napětí, omezení pohyblivosti makromolekul v tavenině, nebo vzniku přetoků. Mimo to



při poklesu tlakové špičky může dojít k zpětnému toku taveniny směrem k trysce ven z formy, což je nežádoucí. Naopak při předčasném přepnutí na dotlak mohou vzniknout propadliny a nedostříknutý výrobek. V důsledku omezeného dotlaku dochází k velkému smrštění výstřiku a povrchovým vadám. Správným přepnutím chráníme jak formu, tak kvalitu výrobku [1,6,7].

Samotné přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak lze řídit např. podle:

- tlaku v tvarové dutině formy,
- dráhy šneku,
- vstřikovacího času,
- tlaku v hydraulice vstřikovacího stroje.



Obr. 2.6 Vliv přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak (vznik tlakové špičky) [10]

### **Fáze dotlaku:**

Tato fáze má za úkol dotlačit taveninu z plastikační komory do dutiny formy, kompenzovat úbytek objemu materiálu, způsobený smrštěním vlivem chladnutí a obecně dosáhnout lepší jakosti povrchu. Se zvyšujícím se dotlakem a dobou dotlaku hmotnost výstřiků vzrůstá, smrštění klesá (dodatečné smrštění při zvýšené teplotě se však zvětšuje) a zvyšuje se i vnitřní napětí [11]. Průběh dotlaku může být konstantní, ale měl by mít klesající tendenci s ohledem na zamezení nežádoucí orientace makromolekul či plniva. Podle obr. 2.3 je tento děj popsán křivkou mezi body 2 až 3, odpovídá dějům ochlazování a postupnému tuhnutí hmoty v dutině formy. Podle velikosti

dotlaku se dá říct, že pokud vzrůstá, tak smrštění klesá a dodatečné smrštění roste zároveň s vnitřním napětím. Čas ukončení dotlaku je dán zatuhnutím vtoku v jeho ústí (bod 4 na obr. 2.3). Po ukončení dotlaku následuje plastikace nové dávky plastu a probíhá pokračující chlazení výstřiku [1,6,7].

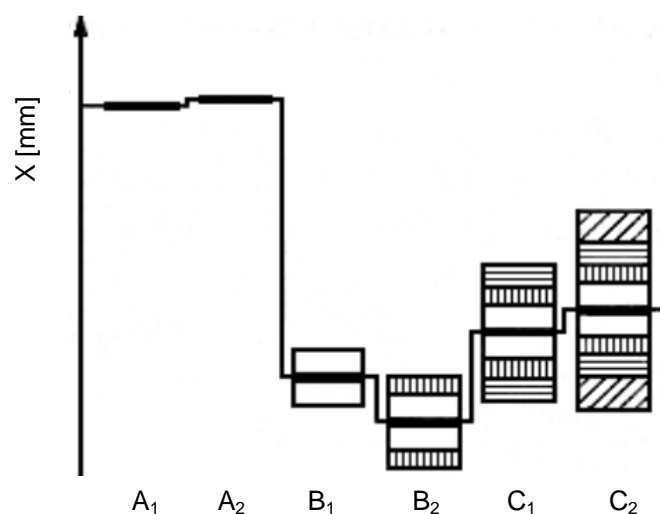
### **Chladnutí výstřiku:**

Doba chlazení je nejdelší a nejdůležitější částí vstřikovacího cyklu. Snahou je tento čas z ekonomického hlediska zkracovat, ale z technologického hlediska by tento čas měl být naopak co nejdelší. Chlazení určuje vnitřní strukturu (krystalický obsah, velikost krystalitů apod.) a vlastnosti polymerů. Na procesu chlazení je závislé také smrštění, vnitřní napětí a deformace výstřiku. Jak je názorně uvedeno v kapitole 2.1.1 (viz obr. 2.1) doba chlazení prolíná s fází plnění dutiny formy, kdy začíná chladnout povrchová vrstva současně s fází dotlaku. Největší vliv na fázi chlazení mají teplota formy, tloušťka stěny výrobku, tvar výrobku, teplota taveniny, rychlost vstřikování, a průběh dotlaku. Během chlazení výstřiku klesá tlak na hodnotu zbytkového tlaku, který působí na ztuhlou hmotu v dutině formy před jejím otevřením (musí být tak vysoký, aby kompenzoval vznik propadlin). Teplota při vyhození musí být taková, aby nedošlo k deformaci výrobku při jeho vyjímání. Chlazení v závěru vstřikovacího cyklu končí vyhozením výstřiku z tvarové dutiny formy a pokračuje dále na vzduchu [1,6,7].

## **2.2 Rozměrová přesnost výstřiků z termoplastů**

Při výrobě plastových výrobků nelze zabránit odchylce od jmenovitého rozměru. Při vstřikování termoplastů dochází ke změně rozměrů v závislosti na čase v důsledku smrštění plastů (viz kap. 2.3). Některé změny rozměrů jsou vratné a některé nevratné. U nevratných změn je myšlena změna rozměrů vlivem používání, u vratných změn je to například změna rozměrů vlivem vystavení výrobku působení vlhkosti. Na obr. 2.7 je zřetelné, že celková tolerance rozměrů daného výrobku je při jeho funkci dána součtem tolerancí všech jeho rozměrových změn (výrobních a funkčních). V souvislosti s touto problematikou je nezbytné brát na vědomí faktory, ovlivňující rozměrovou přesnost, kterými jsou:

- druh materiálu,
- geometrie výrobku,
- technologie výroby,
- technologické podmínky výroby,
- výrobní tolerance atd.



Obr. 2.7 Schéma rozměrových změn a tolerancí u výrobků z plastů [10]

$x$  – střední rozměr,  $A_1$  – rozměr ve formě (černé pole),  $A_2$  – rozměr ve formě po ohřevu formy na provozní teplotu,  $B_1$  – rozměr výrobku po výrobním smrštění po 24h (bílé pole),  $B_2$  – rozměr výstřiku po dodatečném smrštění (kolmo šrafované pole),  $C_1$  – rozměr výstřiku po navlhnutí (vodorovně šrafované pole),  $C_2$  – rozměr výstřiku po ohřátí na provozní teplotu (šikmo šrafované pole)

Výrobní tolerance rozměrů výstřiků z termoplastů jsou stanoveny normou ČSN 64 0006 Tolerance a mezní úchytky rozměrů pro tvářené výrobky z plastů. Tato norma zahrnuje tolerance výrobního smrštění, čili měření výrobku uloženého 24 hodin v suchém prostředí o teplotě  $23 \pm 2$  °C. Norma uvádí jednotlivé třídy přesností s rostoucí velikostí jmenovitých rozměrů přecházející od základní tolerance s vyšší přesností k nižší (výrobek jmenovitého rozměru 30 mm je v toleranci IT 11-12, u jmenovitého rozměru 120 mm je tolerance IT 13 -15). Přesnosti, které je možno dosáhnout, je rozděleno následovně:

IT 10 - IT 12: amorfni termoplasty (např. PC, ABS, PMMA)

IT 11 - IT 13: semikrystalické termoplasty (např. PE, PP, POM)

IT 14 - IT 16: termoplasty s nízkou tuhostí (PVC-P, některé druhy kaučuků)

Při vstřikování na nejmodernějších vstřikovacích strojích, dobře zkonstruovanou formou a ideálně nastavenými vstřikovacími podmínkami, lze dosáhnout přesnosti až IT 8 [5,10].

## 2.3 Smrštění termoplastů

Při ochlazování ze zpracovatelské teploty (tuhnutím taveniny a následným ochlazováním) na teplotu okolí, dochází ke zmenšení objemu výstřiku a materiál se smršťuje. Zvládnutí smrštění je důležité u návrhů, kde je vyžadována přesná tolerance a jmenovité rozměry. Jelikož téma o smrštění úzce souvisí s tématem diplomové práce, bude zde tomuto tématu věnována pozornost. Tím je na mysli, jak se smrštění projevuje a jak je ovlivněno změnou technologických parametrů vstřikování.

Smrštění plastů lze vysvětlit jako objemovou, respektive rozměrovou změnou výrobku v porovnání s rozměrem formy, ke které dochází většinou při tuhnutí taveniny polymerních tavenin. Jeho příčinou je stlačitelnost, tepelná roztažnost a kontrakce plastů a u částečně krystalických polymerů ovlivňující smrštění také procesy krystalizace. Smrštění lze vyjádřit procentuálně jako lineární nebo objemové. Změny objemu lze posoudit dvěma způsoby. Za prvé z hlediska výstřiku jako celku, kdy měřítkem celkových změn je hodnota smrštění, která popisuje o kolik je rozměr menší než je rozměr formy. Nebo se změny objemu týkají jen určitého místa, v důsledku lokálního smrštění, které vede ke vzniku vnitřních dutin nebo propadlin v určitém místě výrobků. Smrštění je způsobené kombinací objemové relaxace, relaxace makromolekul a kombinací teplotního smrštění, u semikrystalických termoplastů je navíc vliv krystalizace. Výsledná hodnota objemu výstřiku je určena zvláště teplotou a tlakem v dutině formy v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku. Zmenšování objemu pokračuje ve zmenšené intenzitě i po delším časovém odstupu od vyrobení součásti, proto se celková hodnota smrštění (celkové smrštění) dělí na výrobní smrštění (16 až 24 hod po vyrobení) a na smrštění po delším časovém okamžiku nebo po temperování čili dodatečné smrštění [5,10].

### 2.3.1 Stanovení smrštění

Celkové smrštění je součet smrštění výrobního, které tvoří asi 90 % a zbylých 10 % tvoří smrštění dodatečné. Celkové smrštění tvoří rozdíl mezi rozměrem tvarové dutiny formy při pokojové teplotě a rozměrem výstřiku po uplynutí 24 hodin a dodatečných úpravách. Celkové smrštění výstřiku se stanovuje v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 294 – 4 [12]. S ohledem na anizotropii vlastností výstřiku je jeho celkové smrštění stanovováno ve směru rovnoběžném ( $S_{Tp}$ ) a ve směru kolmém ( $S_{Tn}$ ) se směrem toku taveniny dle rovnice (1) a (2).

$$S_{Tp} = 100 \frac{l_c - l_2}{l_c} \quad [\%] \quad (1)$$

$$S_{Tn} = 100 \frac{b_c - b_2}{b_c} \quad [\%] \quad (2)$$

Kde je:

$l_2$  a  $b_2$  - délka a šířka zkušebního tělesa (po dodatečné úpravě) [mm]

$l_c$  a  $b_c$  - délka a šířka tvarové dutiny formy mezi příslušnými referenčními body [mm]

### **Výrobní smrštění**

Výrobní smrštění se stanovuje v čase 16 - 24 hodin po výrobě dílu. Je to rozdíl mezi rozměrem tvarové dutiny formy a odpovídajícím rozměrem výrobku. Je závislé na konstrukci výrobku, druhu plastu a technologii, kterou je vyráběn. Vyjadřuje se v rovnoběžném směru toku taveniny  $S_{Mp}$  a ve směru kolmém ke směru toku taveniny  $S_{Mn}$  dle rovnice (3) a (4) [12].

$$S_{Mp} = 100 \frac{l_c - l_1}{l_c} \quad (3)$$

$$S_{Mn} = 100 \frac{b_c - b_1}{b_c} \quad (4)$$

Kde je:

$l_c$  a  $b_c$  - délka a šířka tvarové dutiny formy mezi příslušnými referenčními body [mm]

$l_1$  a  $b_1$  - délka a šířka zkušebního tělesa [mm]

### **Dodatečné smrštění**

Dodatečné smrštění je několikanásobně menší než smrštění výrobní, probíhá poměrně delší dobu v závislosti na typu polymeru a projevuje po více jak 24 hodinách od výroby (po dobu až několika dní či týdnů). Dodatečné smrštění pokračuje zmenšováním objemu až na konstantní hodnotu. Jeho příčinou je např. vnitřní napětí ve výrobku, dezorientace makromolekul u krystalických plastů nebo sekundární krystalizace. Dodatečné smrštění je definováno jako rozdíl mezi rozměrem vstřikovaného zkušebního tělesa před dodatečnou úpravou a po ní (měřeno za pokojové teploty). Dodatečnou úpravou je myšlena temperace v horké komoře, která urychluje změny dodatečného smrštění [10,12].

Dodatečné smrštění se vyjadřuje v rovnoběžném směru toku taveniny ( $S_{Pp}$ ) a ve směru kolmém ( $S_{Pn}$ ) ke směru toku taveniny na zkušebních tělesech dle normy ČSN EN ISO 294 - 4

$$S_{Pp} = 100 \frac{l_1 - l_2}{l_1} \quad [\%] \quad (4)$$

$$S_{Pn} = 100 \frac{b_1 - b_2}{b_1} \quad [\%] \quad (5)$$

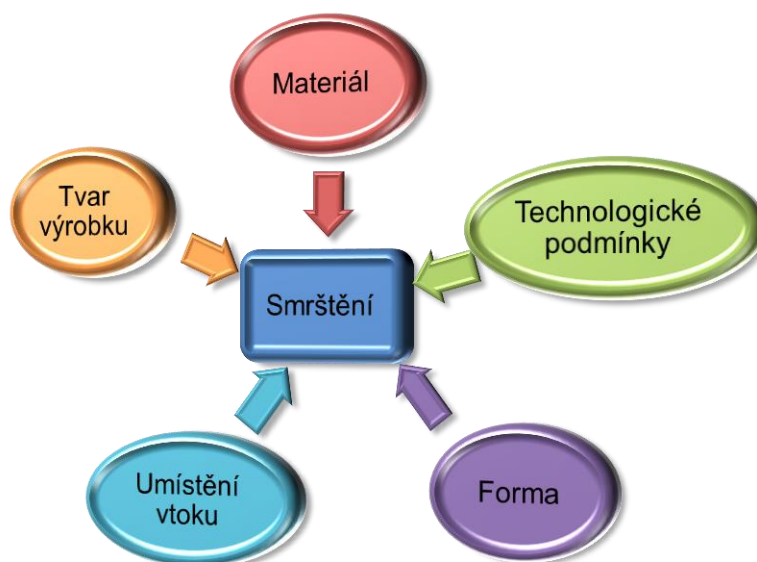
Kde je:

$l_2$  a  $b_2$  délka a šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]

$l_1$  a  $b_1$  - délka a šířka zkušebního tělesa [mm] [12]

### 2.3.2 Faktory ovlivňující smrštění

Smrštění plastových dílů je ovlivněno celou řadou faktorů (viz obr 2.8), jedná se zejména vliv materiálu, technologických podmínek, tvaru výrobku, umístění vtoku a formy. Jelikož předmětem práce není navrhnout nový výrobek či zasahovat do konstrukce formy, ale pouze hodnotit rozměrovou a tvarovou změnu v závislosti na technologických parametrech, bude v této kapitole zaměřena pozornost na vliv technologických parametrů ve vztahu k výstřiku [5].



Obr. 2.8 Faktory ovlivňující smrštění

#### 2.3.2.1 Vliv materiálu na smrštění

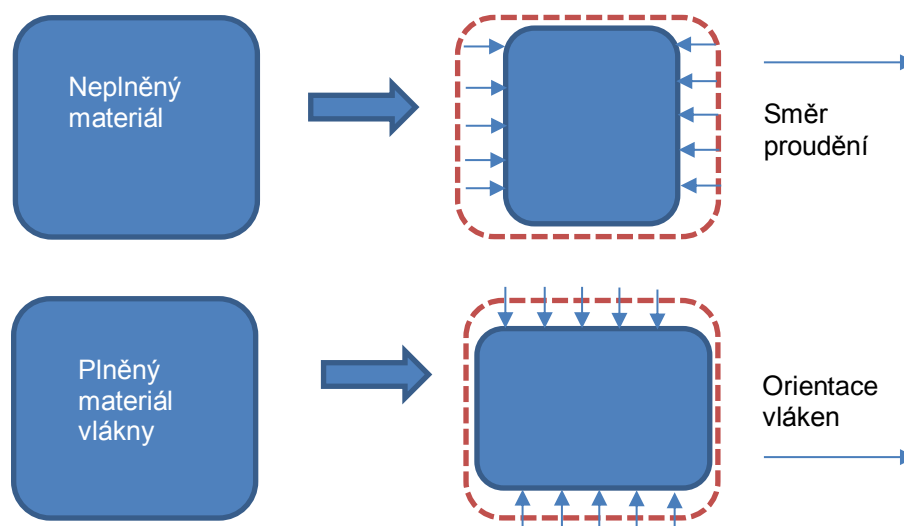
Zvolený materiál je rozhodujícím parametrem procesu vstřikování. Z hlediska nadmolekulární struktury mají obecně amorfny plasty (PS, PC apod.) menší smrštění než plasty semikrystalické (PBT, PP apod.). U semikrystalických plastů je toto větší smrštění dáno důsledkem vzniku krystalické struktury, čili krystalizace. Struktura výrobků je závislá na podmínkách krystalizace a pomalé ochlazování způsobuje vysoký stupeň krystalizace a tím i větší smrštění. Po vyhození výrobku z amorfního materiálu z formy dosahuje hodnota smrštění cca 90 až 95 % celkové hodnoty smrštění. 100 % výrobního

smrštění dosáhne amorfní materiál už po cca 3 až 6 hodinách po vyhození výrobku z formy. Hodnota dodatečného smrštění je velmi malá kolem 5 – 10 %.

Plasty jsou materiály, které mohou obsahovat aditiva pro zlepšení vlastností. Jedním z nich jsou plniva, která nejvíce ovlivňují smrštění a jednou z jejich předností je vyztužující účinek. Je to způsobené v důsledku nižšího součinitele teplotní roztažnosti plniv. Plniva se rozlišují na plniva vláknitá (vyztužující) a částicové (nevyztužující), (viz obr. 2.9).

- Vyztužující plniva – uhlíková, skleněná, kevlarová vlákna
- Nevyztužující plniva – talek, skleněné kuličky, uhličitan vápenatý, prášky

Částicová plniva podle svého množství mohou zvyšovat tuhost na úkor snížení tažnosti a vrubové houževnatosti. Tento druh plniv snižuje smrštění a teplotní roztažnost, zvyšují viskozitu, tvrdost, tuhost a tepelnou odolnost výstřiku. Vyztužující plniva na rozdíl od částicových plniv mohou velmi výrazně ovlivnit smrštění, zejména anizotropii [5,10].



Obr. 2.9 Rozdíly ve směru smrštění plněných a neplněných materiálů [13]

Amorfním materiálům stačí kratší dotlak a ve srovnání se semikrystalickými materiály, vyžadují delší dobu chlazení z důvodu širokého pásma tuhnutí. Smrštění u těchto materiálů je určeno hlavně teplotními ději a tomu napomáhá:

- vysoká homogenita taveniny,
- teplota obou částí formy by měla být přibližně stejná (teplota temperačního media), kde maximální rozdíl by měl být od 3 do 5 °C,
- rychlé chlazení vyvolává orientaci makromolekul na povrchu výrobku a vznik vnitřního napětí na povrchu výrobku, horší povrchový vzhled,

- pomalé chlazení má pozitivní vliv na povrchový vzhled výrobku a snížení orientace makromolekul i vnitřního napětí [5].

### **2.3.3 Vliv technologických parametrů vstřikování na rozměrovou přesnost**

Technologické parametry procesu vstřikování jsou souborem hodnot, které se nastavují na vstřikovacím stroji. Jedná se o vhodně nastavenou kombinaci veličin, jako jsou teplota, tlak, rychlost, doba vstřikování a další, pomocí nichž definujeme vstřikovací proces. Tyto parametry se ovlivňují navzájem, a proto se na ně musí pohlížet komplexněji. Příkladem je zvýšení teploty taveniny, která zkracuje dobu plnění dutiny formy, prodlužuje dobu dotlaku a chlazení. Pokud se na výrobku objeví zjevné vady, lze je odstranit změnou jednoho, nebo více parametrů. Pokud to lze, tak přednostně volíme parametr s okamžitou reakcí na vstřikovací cyklus (tlak, rychlost, časy, bod přepnutí). Působením všech parametrů na výsledný výrobek jsou určeny výsledné stavy výrobků [5,10].

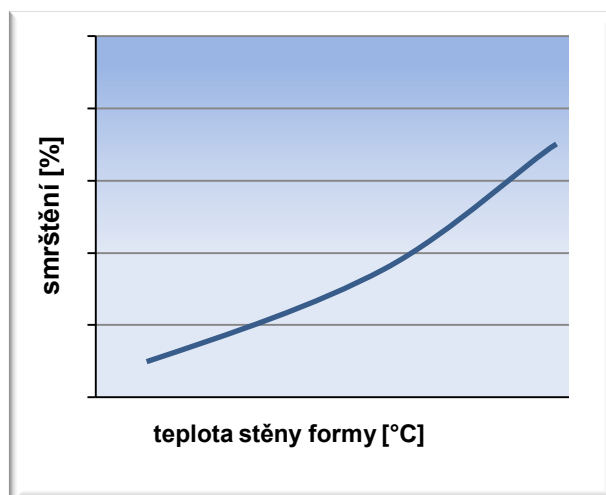
#### **2.3.3.1 Vliv teploty formy**

Vliv teploty formy je jedním z parametrů určující délku vstřikovacího cyklu a dobu ochlazování. Tato teplota je měřena na stěnách povrchu tvarové dutiny formy. Důležitým aspektem je, aby obě poloviny formy (tvárník, tvárnice) měly tyto hodnoty přibližně stejné, protože na chladnější části formy tavenina chladne rychleji a výrobní smrštění je na této straně menší. Tato teplota klesá od svého maxima, kdy je do dutiny formy vstříknuta tavenina plastu k minimu, kdy je výlisek vyhozen z formy. Teplota formy závisí hlavně na volbě druhu materiálu.

#### Důsledek vyšší teploty formy má za následek:

zvýšení výrobního smrštění (viz obr. 2.10) a snížení dodatečného smrštění, lepší zabíhavost taveniny, vyšší rychlost plnění dutiny formy, prodloužení doby cyklu a doby chlazení, lepší kvalitu povrchu, lepší rozměrovou stabilitu, zvýšení vnitřního tlaku a snížení vnitřního napětí. S teplotou formy souvisí i chlazení výrobku. Čas chlazení se volí co nejkratší, ale musí být takový, aby byl výrobek dostatečně ztuhlý, a aby se nedeformoval při vyjímání z dutiny formy. O době chlazení rozhoduje zejména tloušťka stěny a teplota formy. Příliš nízká teplota formy zkracuje ochlazovací fázi [5,10].

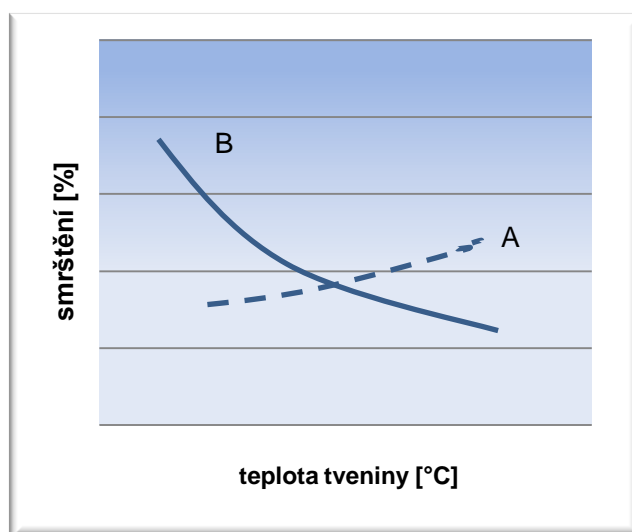




Obr. 2.10 Závislost velikosti smrštění na teplotě [5]

### 2.3.3.2 Vliv teploty taveniny

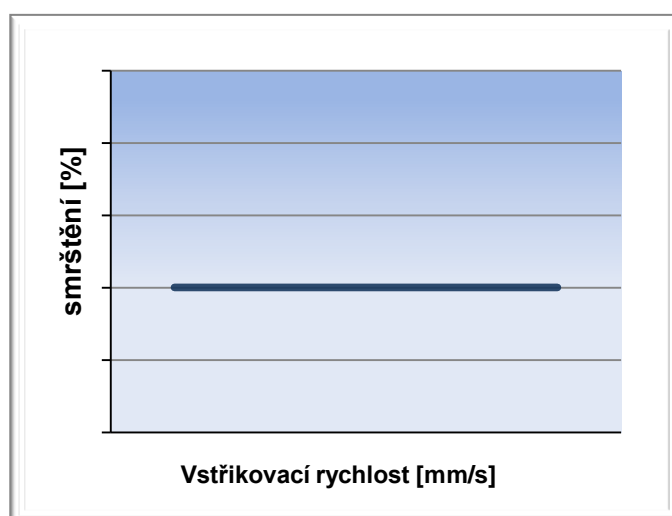
Vliv teploty taveniny na smrštění není jednoznačný. Vliv teploty taveniny na smrštění může být vysvětlen dvěma způsoby. Prvním z nich je zvyšování teploty taveniny, která zvyšuje tepelnou kontrakci a tím i smrštění viz obr. 2.13 křivka A. Křivka B (viz obr 2.11) popisuje zvýšení teploty taveniny, kdy se zvyšuje její viskozita a tím umožňuje vyšší tlakovou odezvu ve výstřiku při dotlaku. Z toho plyne, že dochází ke zmenšení smrštění. Působení dotlaku má na výrobní smrštění zásadnější vliv, a proto je pro určení vlivu teploty taveniny důležitější křivka B. Z praktického hlediska platí, že při optimalizaci procesu vstřikování je účelné nastavit konstantní teplotu taveniny, aby do optimalizace nebyl vnesen nejednoznačně specifikovaný parametry resp. jím ovlivněný výsledek smrštění [5,10].



Obr. 2.11 Závislost velikosti smrštění na teplotě taveniny [5]

### 2.3.3.3 Vliv vstřikovací rychlosti

Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění není jednoznačný. Zvýšení vstřikovací rychlosti vede v důsledku zvýšení smykového namáhání taveniny ke zvýšení její teploty a zároveň ke zvýšení tlakové odezvy v dutině formy. Proti tomuto jevu působí disipace energie (nevratná změna energie na jinou), rozdělení vnitřního napětí, nekonstantní viskozita taveniny, efekty orientace. Tyto jevy mohou působit tak, že smrštění mohou zvyšovat. Pokud je vstřikovací rychlost příliš nízká, může vyvolat také nutnost zvýšení teploty taveniny, aby bylo dosaženo naplnění dutiny formy, a tím dojde ke zlepšení přenosu tlaku a ke zmenšení smrštění. Díky výše uvedeným jevům lze tvrdit, že vliv vstřikovací rychlosti na výrobní smrštění, může být zanedbán (viz obr. 2.12) [5,10].

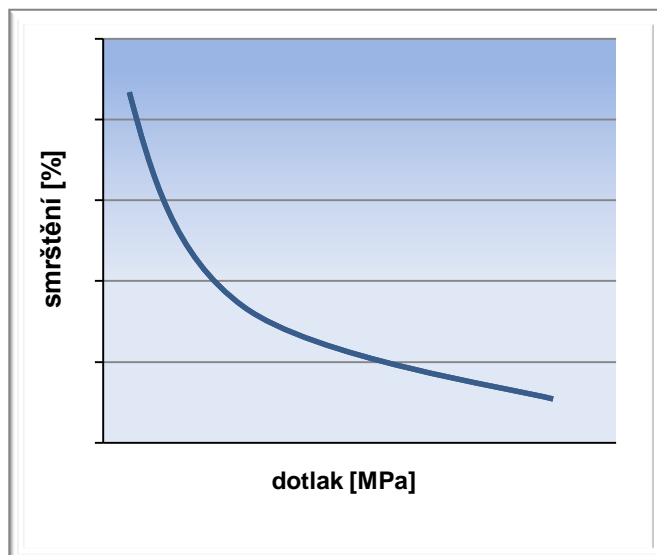


Obr. 2.12 Závislost velikosti smrštění na rychlosti [5]

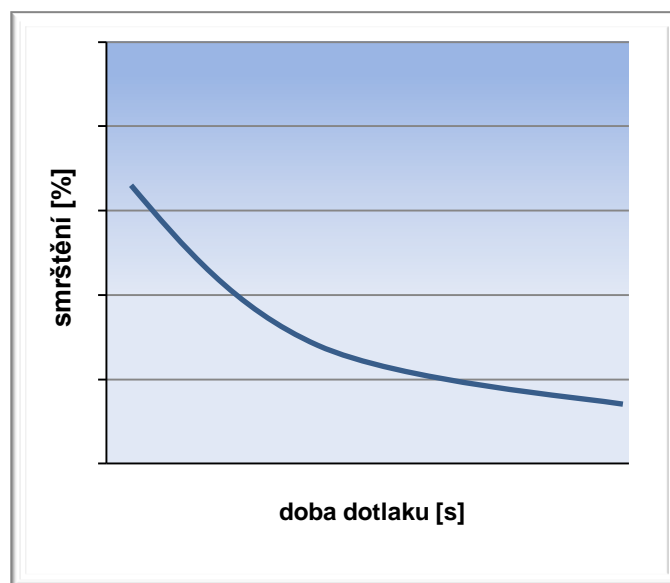
### 2.3.3.4 Vliv fáze dotlaku

Pomocí dotlaku kompenzujeme rozměrové změny způsobené smršťováním hmoty při jejím ochlazování a dotlačování taveniny. Stejně jako vstřikovací tlak je definován tlak na čele šneku. Velikost dotlaku je dána druhem plastu a měl by odpovídat postupu smrštění plastu v dutině formy. Velikost dotlaku má ve výsledku vliv na konečnou strukturu a budoucí vlastnosti výrobku. Vysoká úroveň dotlaku může snížit velikost výrobního smrštění, ale vnáší do výrobku velké vnitřní napětí. Průběh velikosti dotlaku na smrštění výstřiku je zobrazen na obr. 2.13. Zvýšením dotlaku u semikrystalických materiálů je smrštění lépe kompenzováno než u plastů amorfních. Delší působení dotlaku se může prodloužit a prodloužit výrobu. Fáze dotlaku se prolíná s fází chlazení. A její doba trvání může trvat od pár sekund až po desítky sekund, záleží na jeho

složitosti. Doba dotlaku je ovlivněna konstrukcí a tloušťkou stěny. Čím větší je doba dotlaku a jeho velikost (viz obr. 2.14), tím menší je smrštění [5,10].



Obr. 2.13 Závislost smrštění na velikosti dotlaku

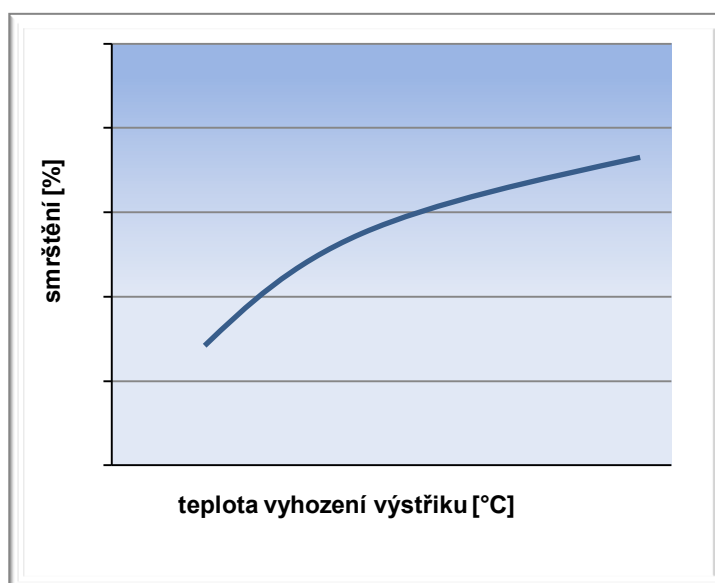


Obr. 2.14 Závislost smrštění na době dotlaku [5]

### 2.3.3.5 Vliv doby chlazení

Čas chlazení se volí co nejkratší, ale musí být takový, aby byl výrobek dostatečně ztuhlý, a aby se při vyjímání z dutiny formy nedeformoval. O době chlazení rozhoduje zejména tloušťka stěny a teplota formy. Do ochlazovací fáze se počítá doba dotlaku a doba chlazení bez tlaku, končí otevřením formy a vyhozením výstřiku z formy.

Například čím je ochlazování výrobku pomalejší, tím je u semikrystalických plastů obsah krystalického podílu větší, tím vzrůstá smrštění, hmotnost, mez pevnosti, navlhavost atd. a klesá dodatečné smrštění. Ochlazování výrobku pokračuje dále i po vyhození výrobku z formy a výstřiky chladnou mimo formu na teplotu okolí. S tím souvisí i jakou teplotu má výrobek v době, kdy opouští formu, protože jak popisuje obr. 2.15, s rostoucí teplotou vyhození výstřiku stoupá velikost smrštění. Tento jev koresponduje i se skutečností, že největší smrštění, které je známo, je smrštění výrobní (viz kapitola 2.2.1) [5,10].

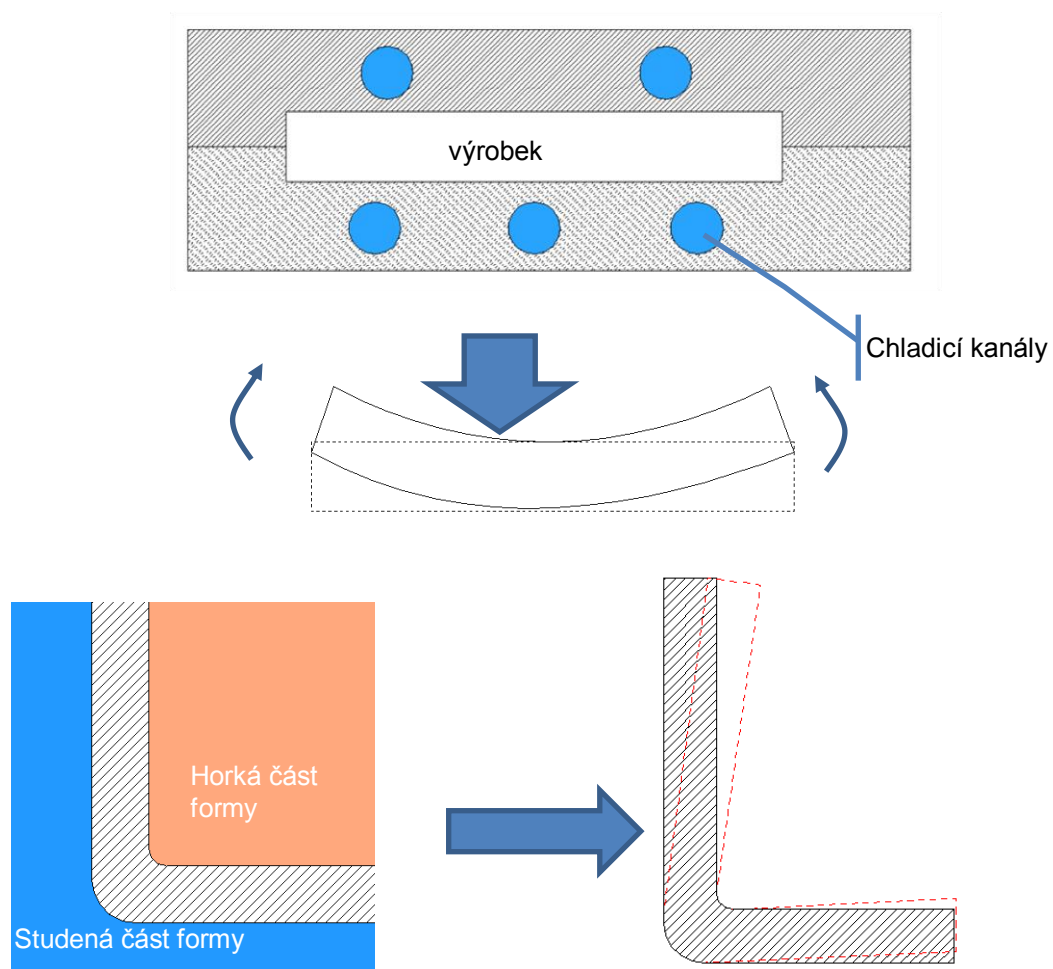


Obr. 2.15 Závislost velikosti smrštění na teplotě vyhození výstřiku [5]

### 2.3.3.6 Vliv procesních parametrů

Jelikož v této diplomové práci není účelem měnit konstrukci nebo geometrii výrobku, je tato část pouze informativního charakteru.

- větší tloušťka stěny → větší smrštění,
- není vhodné navrhovat náhlé změny tloušťky stěn, ale volit plynulé přechody a zaoblení,
- rozdílná tloušťka stěny výrobku a jeho žebra → rozdílné smrštění a deformace,
- umístění ústí vtoku by mělo být v nejtlustším průřezu výrobku, aby nedošlo k předčasnému zamrznutí taveniny. Dále je nutné vhodně velikost a tvar ústí vtoku,
- kovová jádra (vložky) ve výstřiku zabraňují volnému smršťování,
- vliv na smrštění má vnesení vnitřního napětí do vylisku,
- nestejnéměrné chlazení v celé tloušťce dílu může vést k rozdílnému smrštění např. obr. 2.16 [5,14].



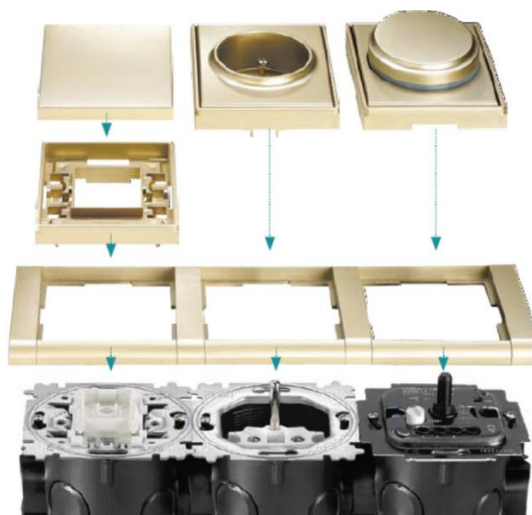
Obr. 2.16 Vliv nerovnoměrného chlazení výrobku a deformace [13]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

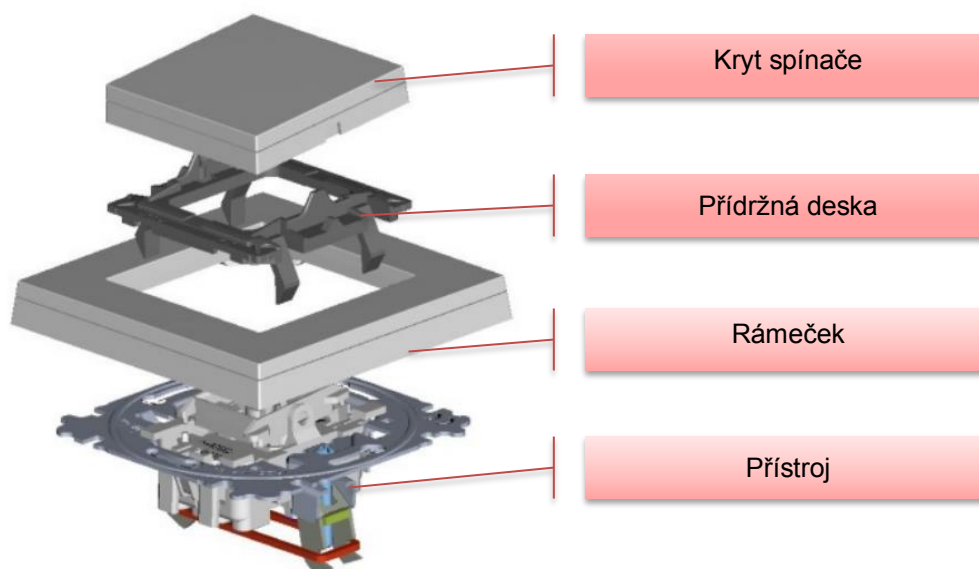
Experimentální část diplomové práce se zabývá analýzou rozměrových změn a deformací vybraného výrobku zhotoveného technologií vstřikování při různých profilech dotlaku, rychlosti chlazení, resp. teplotě temperačního media formy době chlazení. Díly byly skladovány při pokojové teplotě a po více jak 48 hodinách bylo provedeno hodnocení tvarové a rozměrové přesnosti bezdotykovou metodou ATOS. Výsledky měření byly srovnány s výkresovou dokumentací a s výrobkem, který byl vstřikován při stávajících vstřikovacích parametrech ve výrobě (standardních podmínkách výroby).

#### 3.1 Charakteristika výrobku

Experimentální měření bylo provedeno ve spolupráci s firmou ABB Elektro Praga s.r.o. na dílu trojnásobného rámečku designové řady Levit (viz obr. 3.1). Tento díl (trojnásobný rámeček) je vybrán z důvodu větší prokazatelnosti výrazných deformací než by tomu tak bylo u jednonásobného rámečku v sestavě dle obr. 3.2. Zkušební vzorek, na kterém bylo prováděno měření, je designové řady Levit s označením 3901H-B30. Tento rámeček je kompletován spolu v sestavě pro uložení tří přístrojů vedle sebe, viz obr. 3.1. Pro příklad je zde uvedena montáž sestavy vypínače jednonásobného rámečku (totožná s montáží u trojnásobného rámečku) s přístrojem zásuvky, přídržnou deskou a krytem spínače, který se upevňuje na vrchní část tohoto rámečku (viz obr. 3.2). Při montáži je třeba zajistit polohu rámečků pomocí výřezů. Dalším důležitým aspektem je správné dosednutí celé spodní části rámečku na rovinnou dosedací plochu. Zde je nutné postupovat tak, aby nevznikly tvarové odchylky (deformace), které by mohly narušit estetickou stránku výrobku, a které jsou rovněž předmětem sledování diplomové práce.



Obr. 3.1 Model trojnásobného rámečku a využití funkce rámečků [15]



Obr. 3.2 Příklad montáže spínače řady Levit [15]

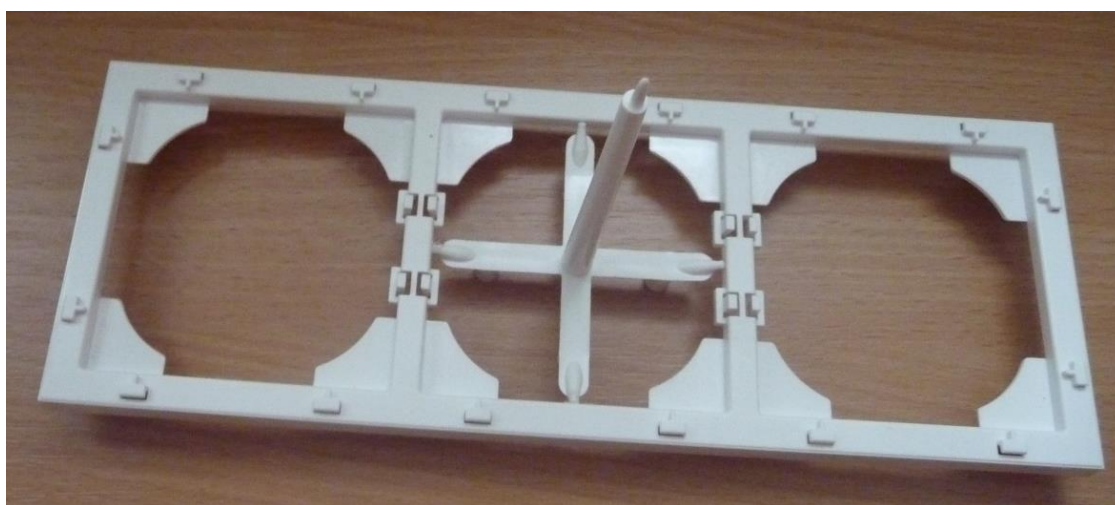
Materiálem použitým pro výrobu rámečků je polykarbonát (amorfní plast) obchodního označení Xantar 19UR. Dle požadavků zákazníka jej lze kombinovat s příslušným typem barvicího koncentrátu. Specifikace materiálu včetně jeho užitých vlastností je uvedena v příloze P1. Polykarbonát je hydrofilní materiál a před samotným zpracováním se suší při teplotě 120 °C nejméně po dobu 2,5 hodiny tak, aby s ohledem na podmínky zpracování a jakost výrobku byla zaručena co nejmenší zbytková vlhkost v materiálu. Při špatném vysušení mohou na výrobku vznikat vlhkostní šmouhy, drobné bubliny, rozdíly v probarvení nebo lesku apod.

### 3.2 Výroba dílu – současný stav (standardní podmínky)

Výrobky jsou ve firmě ABB lisovány na vstřikovacím lisu Arburg Allrounder 470 S 1100-170/100 s horizontální koncepcí (viz obr. 3.3). K výrobě je použito jednonásobné dvoudeskové formy s jednou dělicí rovinou. Plnění tvarové dutiny formy je řešeno čtyřbodovým ústím vtoku (viz obr. 3.4). Z tvarové dutiny formy jsou výrobky vyjímány pomocí manipulátoru (viz obr. 3.5) na pásový dopravník a skládány do přepravek k další montáži. Výrobky jsou vizuálně kontrolovány: např. zda jsou dostříknuty a zda nevykazují výrazné deformace, např. prohnutí. Dále je kontrolováno správné dosednutí jednotlivých komponent sestavy.

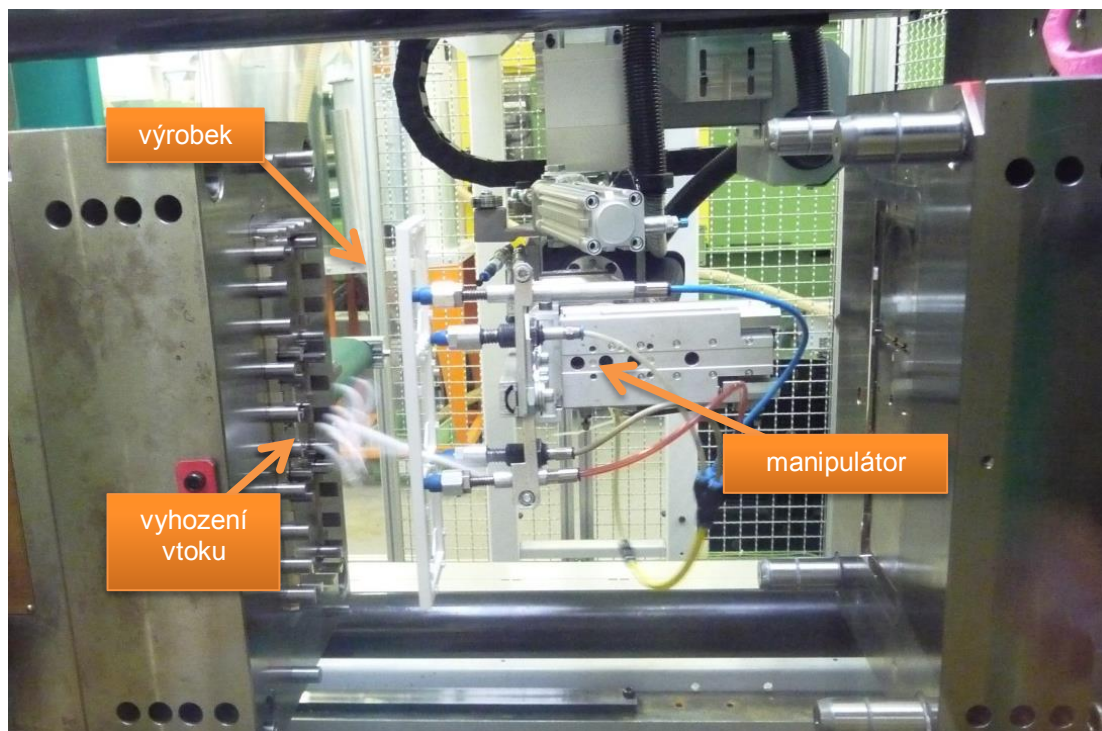


*Obr. 3.3 Allrounder 470 S [20]*



*Obr. 3.4 Řešení vtokové soustavy výstřiku*





Obr. 3.5 Vyjímání výrobku z formy

Díly jsou vyráběny za standardních technologických podmínek, které jsou uvedeny v tab. 3.1. Okamžik přepnutí vstřikovaného tlaku na dotlak je řízen na základě množství vstříknutého materiálu do dutiny formy. K temperaci formy je používáno tlakových temperačních jednotek s cirkulující vodou v temperačních kanálech tvarových částí formy. Pro naplnění cílů diplomové práce bylo v rámci experimentálního měření (na základě předchozích testů provedených technologickým oddělením firmy ABB) přistoupeno ke změně profilu dotlaku, změně teploty a doby chlazení pomocí temperačního media s cílem sledování tvarové a rozměrové přesnosti dílu při jejich možných minimálních a maximálních hodnotách, jakož i s cílem jejich případné optimalizace ve vztahu k rozměrové a tvarové přesnosti dílu. Uvedené parametry vykazovaly v předběžných testech největší předpoklad k rozměrovým a tvarovým změnám výlisku. Takto bylo nalisováno 9 variant včetně varianty lisování při standardních podmínkách, každá o deseti kusech při ustálených parametrech cyklu.

Tab. 3.1 Standardní nastavení vstřikovacích parametrů

Parametr	Hodnota	
Vstřikovací objem (dávka) [cm <sup>3</sup> ]	40	
Teplota topných pásem tavící komory (směrem od násypky) [°C]	290/295/300/305	
Teplota ve formě [°C] tvárník/tvárnice	105/100	
Teplota trysky [°C]	305	
Průměr šneku [mm]	30	
Rychlost plastikace [m/min]	10	
Zpětný tlak [MPa]	4	
Vstřikovací tlak [MPa]	155	
Rychlost vstřikování [cm <sup>3</sup> /s]	65/80	
Bod přepnutí na dotlak [cm <sup>3</sup> ]	7	
Profil dotlaku	dotlak [MPa]	čas působení [s]
1. úroveň	60	1
2. úroveň	50	2,5
3. úroveň	40	0,5
Čas dotlaku [s]	4	
Čas vstřikování [s]	1,25	
Čas plastikace [s]	7	
Čas chlazení po dotlaku a plastikaci [s]	20	
Čas cyklu [s]	33	

**Změna parametrů:** viz tab. 3.2

***Teplota tvarových částí formy, resp. teplota temperačního média:***

Teplotou formy je myšlen povrch tvarových částí formy a je regulována nepřímo pomocí temperačního média.

- 1a) Změna teploty tvárníku (pohyblivé části) byla z původních 105 °C zvýšena na 115 °C a teplota tvárnice (pevná strana formy) byla ponechána na hodnotě 100 °C.

***Doba chlazení:***

Doba chlazení byla snížena a zvýšena oproti základnímu nastavení, vždy byla změněna o 9 s, aby byl viditelný vliv této doby na velikost smrštění výstřiku. Doba chlazení byla počítána od ukončení doby dotlaku.

- 2a) Zkrácená doba chlazení o 9 s (nastaveno 11s na hodnotu doby chlazení)
- 2b) Prodloužená doba chlazení o 9 s, (nastaveno 29 s na hodnotu doby chlazení)
- 2c) Prodloužená doba chlazení o 18 s, (nastaveno 38 s na hodnotu doby chlazení)

**Velikost a doba dotlaku:**

Došlo ke snížení velikosti profilu dotlaku, poté se tlak zvýšil téměř na dvojnásobnou hodnotu a cyklus se zkrátil o 0,2s a ve třetí variantě byl profil doba dotlaku snížen.

- 3a) Tlak při profilu dotlaku snížen na minimální možnou hodnotu, 40 MPa po 0,3s; 30 MPa po 2,5 s; 10 MPa po 0,5 s
- 3b) Tlak při profilu dotlaku zvýšen na vysokou hodnotu, 120 MPa po 0,3s; 100 MPa po 2,5 s; 80 MPa po 0,5 s; 100 po 0,5 s
- 3c) Snížení doby dotlaku na minimální hodnotu 60 MPa po 0,2 s; 50 MPa po 0,3 s; 40 MPa po 0,3 s

**Změna materiálu**

- 4a) V experimentu měření byl nahrazen PC Xantar 19 UR materiálem PC Lexan Resin 932 od firmy Sabic innovative plastic, jehož specifikace užitečných vlastností jsou uvedeny v příloze P2.

Tab. 3.2 Seznam změněných parametrů

Označení	Typ parametru	Původní hodnota		Změna hodnoty	
1a)	Změna teploty temperačního media (formy) tvárník/tvárnice	105/100 °C		115/100°C	
2a)	Snížení doby chlazení	20 s		11 s	
2b)	Zvýšení doby chlazení	20 s		29 s	
2c)	Zvýšení doby chlazení	20 s		38 s	
3a)	Snížení profilu dotlaku	dotlak [MPa]	čas [s]	dotlak [MPa]	čas [s]
		60	1	40	1
		50	2,5	30	2,5
		40	0,5	10	0,5
3b)	Zvýšení profilu dotlaku	dotlak [MPa]	čas [s]	dotlak [MPa]	čas [s]
		60	1	120	0,3
		50	2,5	100	2,5
		40	0,5	80	0,5
				10	0,5
3c)	Snížení doby profilu dotlaku	dotlak [MPa]	čas [s]	dotlak [MPa]	čas [s]
		60	1	60	0,2
		50	2,5	50	0,3
		40	0,5	40	0,3
4a)	Materiál	Xantar 19 UR		Lexan Resin 932	

Je důležité podotknout, že při každé změně technologického parametru se musí nechat proces vstřikování ustálit, aby nebyly do procesu vneseny vlivy (změna teploty, dotlaku, doba chlazení apod.) z předešlého cyklu vstřikování.

### 3.3 Měření rozměrové a tvarové přesnosti dílů

Pro měření a hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti vstřikovaných dílů bylo použito bezkontaktního 3D digitalizovaného systému ATOS od firmy GOM. Systém při přenosu snímání vykreslil povrch tělesa v podobě mraku bodů. Pro získání těchto bodů byl využit princip fotogrammetrie a triangulační metody promítání světelného vzoru na objektu. Pomocí softwaru byla během procesu zobrazena poloha skeneru od snímaného objektu. Proces digitalizace je velmi rychlý, přesný a dynamický s velkou hustotou naměřených dat. Nasnímaná data byla následně upravena softwarem ATOS a naměřené body transformovány na polygonální síť. Mezi základní části systému ATOS (viz obr. 3.6) patří:

- skenovací hlava složená ze dvou digitálních kamer a projekční jednotky,
- mobilní stojan s polohováním hlavy v pěti osách,
- výkonný počítač,
- nekódované referenční body,
- kalibrační elementy,
- otočný stůl.

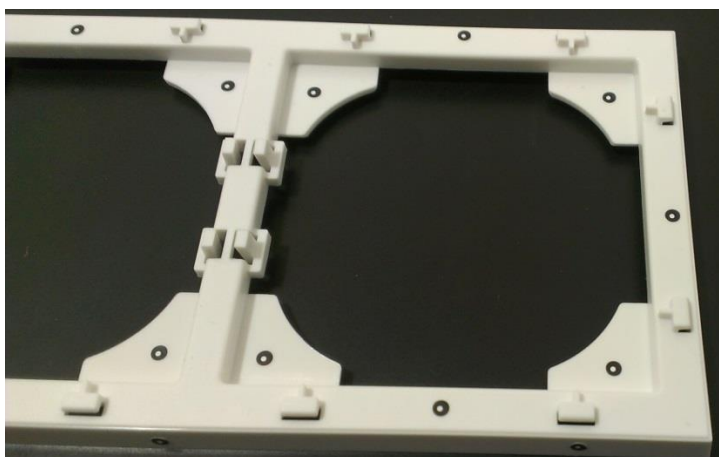


Obr. 3.6 Skenovací systém ATOS III [18]

### 3.3.1 Příprava digitalizovaného objektu

Na digitalizovaný povrch rámečku byly umístěny nekódované referenční body tak, aby v každé poloze objektivu skenovací kamery byly vidět minimálně 3 body (viz obr. 3.7). Podle počtu viditelných bodů je ovlivněna přesnost polohování naměřeného mraku bodů vzhledem k jednotnému souřadnému systému. [17] Nežádoucím jevem při snímání je lesklý povrch výrobku. Kamera není schopna takovýto povrch dostatečně naskenovat, proto byl použit křídový sprej pro odstranění lesku.

Po přípravě digitalizovaného objektu byla následně provedena kontrola a kalibrace systému ATOS. Bylo zkontrolováno zapojení všech konektorů a zkontrolována stabilita stativu. Pro stabilizaci skenování je nutné provést kalibraci kamer. Kalibrace kamer byla provedena při provozní teplotě pomocí kalibrační desky a softwaru ATOS a poté začal vlastní proces měření.

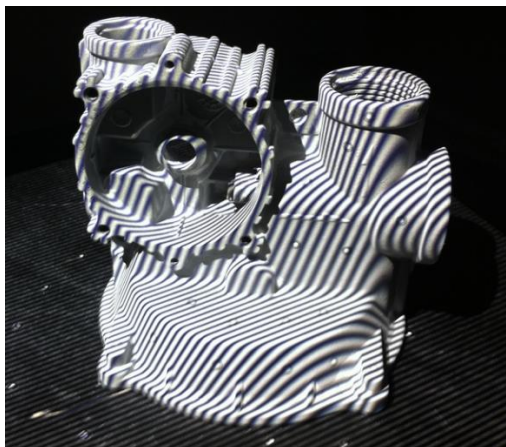


Obr. 3.7 Detail nanesených referenčních bodů na skenovaný díl

### 3.3.2 Proces měření a možnosti vizualizace výsledků

Skenovací hlavou ATOS bylo namířeno na snímáný objekt tak, aby digitální kamery viděly minimálně 3 referenční body. Projekční jednotka promítala na snímanou scénu pásy pohybujících se pruhů (viz obr. 3.8), které byly snímány digitálními kamerami. Software ATOS vypočetl během pár sekund s vysokou přesností souřadnice 4000000 bodů a ty byly umístěny vzhledem k těmto referenčním bodům. Systém automaticky rozeznal pozice těchto bodů, a proto při dalším měření umístil nově získaná data do jednotného souřadného systému. Díky tomuto principu skenování bylo možné s digitalizovaným objektem pohybovat a polohovat ho pro další skenování. Jednotlivé

dílčí snímky byly poté umístěny do jednotného souřadného systému, které vytvořily rozsáhlý soubor dat.

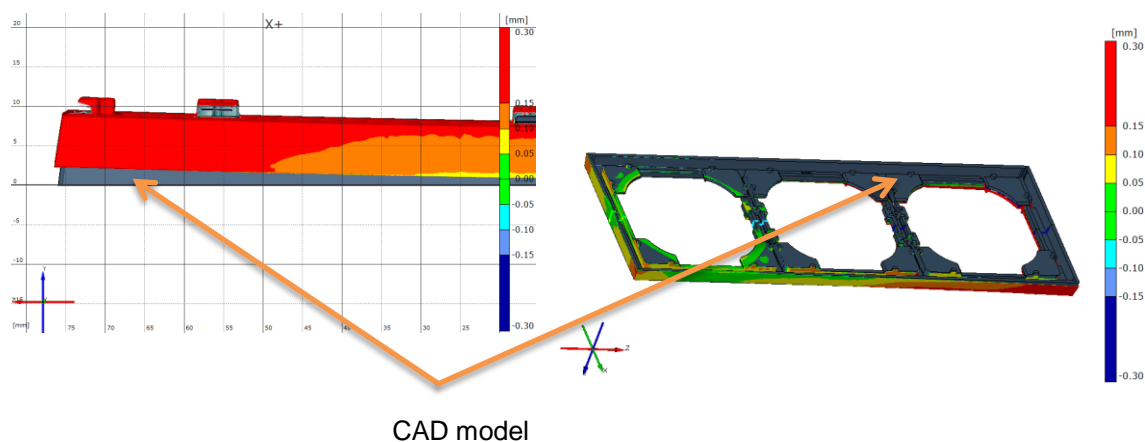


Obr. 3.8 Princip projekce sítě proužků na dílů (ilustrační obrázek) [19]

Takto získaný soubor dat obsahující velké množství bodů, je velmi obtížný na zpracování, proto bylo pro snížení počtu bodů využito softwaru ATOS, který umožnil vhodně proložit mrak bodů trojúhelníky, jejichž spojením vznikla polygonální síť. Tato síť vytvořila texturu povrchu digitalizovaného objektu. Výstupem z digitalizace mohou být:

- optimalizovaná polygonální síť,
- mrak bodů,
- řezy v příslušných místech,
- barevná mapa odchylek od CAD modelu.

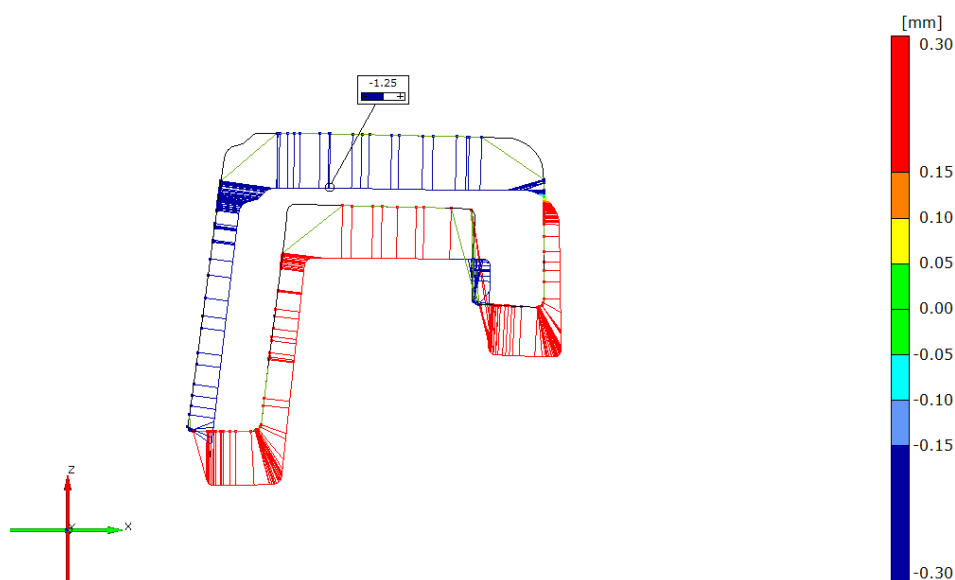
Na obr. 3.9 je vidět porovnání dat CAD modelu a dat získaných skenováním. Tmavá, šedá barva představuje CAD model a barevné mapy jsou data shodná se skenovaným dílem. Hodnota CAD dat jednotlivých bodů je stanovena jako výchozí stav pro měření (nula).



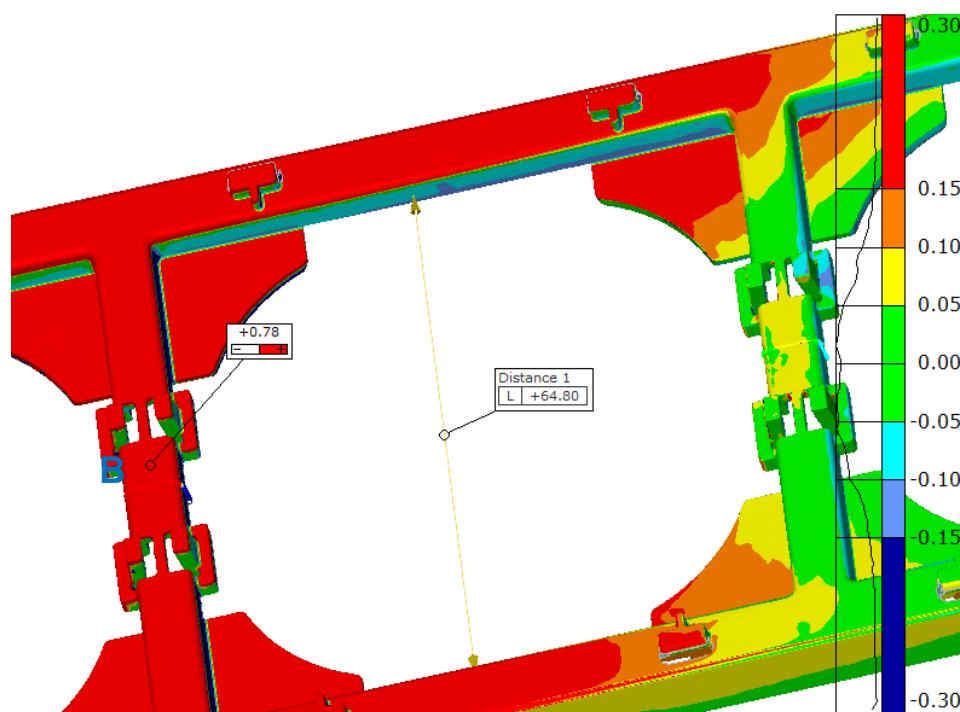
Obr. 3.9 Vizualizace výsledků barevné mapy odchylek od CAD modelu



Na obr. 3.10 je příklad zobrazení pomocí řezu, kde je názorně vidět princip a určení velikosti odchylky. Zde je zobrazena odchylka rozdílu dvou barevných map.



Obr. 3.10 Zobrazení odchylky v řezu příslušného místa



Obr. 3.11 Zobrazení výsledků

Pomocí softwaru ATOS je možnost určení odchylky bodu, který má přidělenou hodnotu souřadnic X,Y,Z (viz příklad bodu B na obr. 3.11). Možné je také zobrazení velikosti rozměrů dílce a jejich porovnání s CAD daty modelu ve vztahu k požadované rozměrové toleranci. V následující kapitole budou určeny rozměry a pozice pro vyhodnocení.

### 3.4 Výběr rozměrů a pozic dílu pro vyhodnocení výsledků

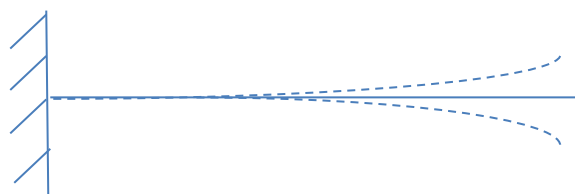
Pro hodnocení rozměrů dílu byly vybrány jeho funkční rozměry podle výkresové dokumentace součásti (viz příloha P3). Mezi ně patří celková délka „D” ( $223 \pm 0,1$ ) mm a dále rozměr šířky „S” ( $81 \pm 0,1$ ) mm (viz obr. 3.14). Rozměr šířky dílu není významný, protože nemá žádný vliv na funkčnost. Dále je sledována celková hodnota tvarové odchylky deformace (prohnutí dílu), která je zásadní pro dosednutí na rovinnou plochu. Při každé změně vstřikovacích parametrů byla provedena i vizuální kontrola dílu, tj. zda nedošlo ke zjevným a povrchovým vadám. Při vstřikování dílu docházelo k tvarové deformaci dílu v místě A (vyznačené na obr. 3.12), proto byla tomuto místu věnována pozornost. Pokud došlo k jakémukoliv defektu v tomto místě, je tato vada zdokumentována v diskuzi výsledků.



Obr. 3.12 Místo možného vzniku vady, způsobené změnou vstřikovacího parametru  
(pozn. fotografie standardně vstřikovaného dílu)

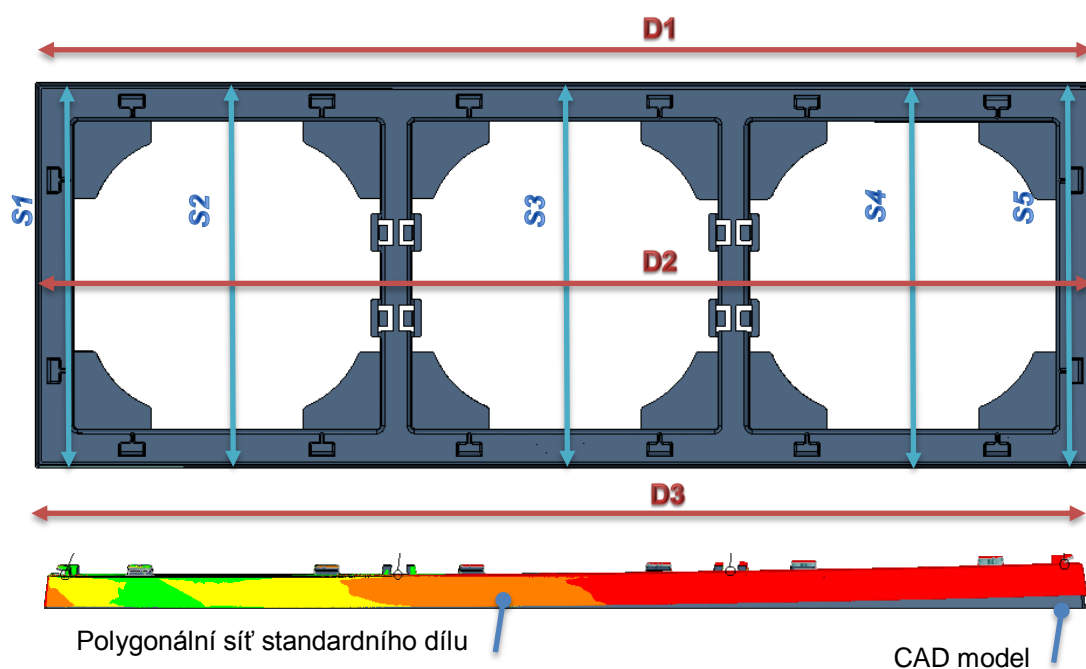


V programu ATOS byl díl ustavován tak, aby byla zřetelná tvarová deformace (celkový průhyb) na jednom konci dílu. Proto se vzájemně ustavil CAD model a polygonální síť pomocí tří bodů na krajní hrany strany druhé. V principu je to ohnutý nosník (viz obr. 3.13). Samozřejmě, že deformace může mít průběh jiný, například deformace může být na obou stranách nesymetrická. Poté jsou všechny ostatní sítě ustavovány vůči dílu vyrobenému při standardních vstřikovacích podmínkách. Zde je možné posoudit, o jakou hodnotu se deformace oproti standardnímu dílu zvětšily nebo zmenšily.

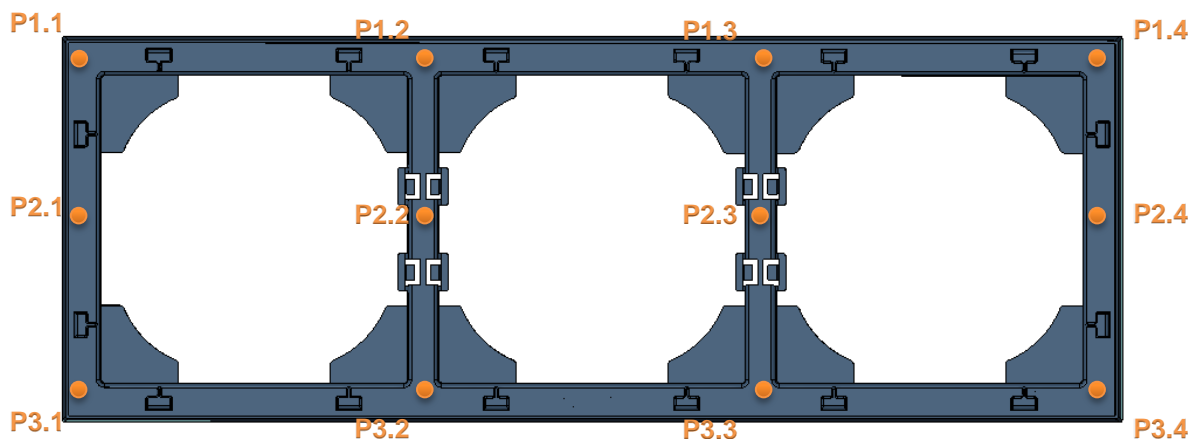


*Obr. 3.13 Princip ustavení sítě vůči CAD modelu a ostatních sítí spolu s možným vznikem průhybů, které mohou nastat při měření*

Na obr. 3.14 jsou vybrána místa, která byla určena pro hodnocení sledování rozměrů (délky a šířky rámečku) a deformace dílu. Rozměry S1, S2, S3, S4, S5 označují hodnotu šířky v různých místech dílu, rozměry D1, D2, D3 jsou hodnoty délky na okrajích součásti a jeho středu. Hodnoty P1.1, P1.2, P1.3, P2.1, P2.2,...P4.3 jsou odchylky deformace prohnutí v daných bodech (viz obr. 3.15).



*Obr. 3.14 Výběr hodnocených rozměrů D a S*



Obr. 3.15 Výběr hodnocených odchylek deformací P

### 3.4.1 Analýza získaných údajů digitalizovaných modelů dílu rámečku

Při každé změně technologických podmínek (včetně standardních podmínek) bylo po jejich ustálení zhotoveno vždy 10 výrobků. Pomocí systému ATOS byl změřen každý třetí díl a z naměřených rozměrů byl vypočítán aritmetický průměr. Tento výsledek lze brát jako dostačující, protože výrobní cyklus byl u každé změny parametru ustálen. Výsledné zobrazení analýzy barevnou mapou je uvedeno v příloze P4 až P12. Toto zobrazení je uvedeno pouze pro jeden díl z dané série. Ostatní barevné mapy jsou součástí příložených CD k diplomové práci.

Stávající stav výrobku tj. velikost sledovaných rozměrů a velikost deformace dílu ve sledovaných místech dle obr. 3.14 a obr. 3.15 je zaznamenán v tab. 3.3 a tab. 3.4. Zelenou barvou jsou zobrazeny hodnoty, které vyhovují výkresové dokumentaci resp. 3D CAD modelu a červenou barvou jsou zobrazeny rozměry, které jsou mimo toleranci.

Tab. 3.3 Tabulka hodnot odchylek v jednotlivých bodech P standardního dílu

Standard	Odchylna dílu v bodech P							
	P X.1	směr. od.	P X.2	směr. od.	P X.3	směr. od.	P X.4	směr. od.
1	0,07	± 0,02	0,18	± 0,02	1,02	± 0,02	2,60	± 0,01
2	0,05	± 0,02	0,05	± 0,01	0,81	± 0,03	2,29	± 0,05
3	0,12	± 0,00	0,43	± 0,36	0,73	± 0,04	2,25	± 0,06

Tab.3.4 Tabulka hodnot délky a šířky standardního dílu

Standard	Délka dílu			Šířka dílu				
Rozměr	D1	D2	D3	S1	S2	S3	S4	S5
Naměřená hodnota	223,59	223,38	223,59	81,16	80,97	81,03	81,00	81,18
Směr. od.	± 0,02	± 0,02	± 0,05	± 0,00	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,01
Předepsaný rozměr	223± 0,1	223± 0,1	223± 0,1	81 ± 0,1	81± 0,1	81± 0,1	81± 0,1	81± 0,1

Z naměřených hodnot plyne, že rozměr šířky dílů je v krajních místech výstřiku (S1, S5) nepatrně větší než je uvedená tolerance na výkrese, zbylé hodnoty jsou v toleranci. Co se týče délkových rozměrů (D1 až D3), tak ani jeden měřený rozměr není v požadované toleranci. Největší hodnota tvarové odchylky průhybu je  $(2,60 \pm 0,01)$  mm v krajním bodě P1.4. Pro hodnocení optimalizace technologických parametrů na rozměrovou přesnost dílu bude brán v potaz současný stav dílu. V následujících kap. 3.4.2 až 3.4.5 jsou vyjádřeny změny odchylek deformace v bodech P, kde odchylka deformace v daném místě je vyjadřována jako rozdíl deformace k standardnímu dílu. Rozhodující hodnotou pro hodnocení této tvarové odchylky je celková tvarová odchylka v místech PX.4. V kap. 3.4.6 až 3.4.12 jsou interpretovány výsledky přesnosti šířky a délky dílu vzhledem k výkresové dokumentaci 3D CAD modelu.

### 3.4.2 Vliv změny teploty temperačního media (formy) na velikost tvarové odchylky v bodech P

Tab. 3.5 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při změny teploty temperačního media

1a	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	-0,01	± 0,01	0,03	± 0,00	0,10	± 0,00	0,24	± 0,03
2	0,00	± 0,01	-0,01	± 0,01	0,05	± 0,01	0,15	± 0,01
3	-0,05	± 0,04	0,01	± 0,04	0,04	± 0,04	0,08	± 0,02

Při zvýšení teploty temperačního media na tvárníku o 10 °C je z tab. 3.5 zřejmé, že v místech PX.3 a PX.4 dochází ke zvětšování tvarové odchylky od současného stavu dílu. Celková odchylka se zvětšila ve všech bodech P1.4, P2.4, P3.4. Vzhledem

k celkové tvarové odchylce došlo k největšímu navýšení v bodě P1.4 až o hodnotu  $(0,24 \pm 0,03)$  mm. Nejnižší tvarová odchylka nastala v bodě P1.4 o hodnotě  $(0,08 \pm 0,02)$  mm.

### 3.4.3 Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku na velikost tvarové odchylky v bodech P

V této kapitole jsou uvedeny 3 různé varianty změny doby chlazení. V případě varianty 2a došlo ke snížení této doby chlazení o 9 s a u varianty 2b a 2c došlo k zvýšení doby chlazení o 9 s a o 18 s. Všechny tvarové odchylky dílu jsou vztahovány k současnému stavu výroby.

Tab. 3.6 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při snížení doby chlazení po dotlaku a plastikaci o 9 s

2a	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	0,04	$\pm 0,02$	0,19	$\pm 0,01$	-0,03	$\pm 0,03$	-0,46	$\pm 0,00$
2	0,00	$\pm 0,02$	0,16	$\pm 0,02$	-0,04	$\pm 0,01$	-0,49	$\pm 0,00$
3	-0,11	$\pm 0,01$	0,14	$\pm 0,00$	-0,06	$\pm 0,06$	-0,56	$\pm 0,04$

Tab. 3.7 Tabulka hodnot odchylek v jednotlivých bodech P při zvýšení doby chlazení po dotlaku a plastikaci o 9 s

2b	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	0,02	$\pm 0,01$	0,21	$\pm 0,02$	0,24	$\pm 0,02$	0,16	$\pm 0,03$
2	-0,03	$\pm 0,03$	0,14	$\pm 0,02$	0,16	$\pm 0,03$	0,12	$\pm 0,07$
3	-0,05	$\pm 0,09$	0,19	$\pm 0,01$	0,25	$\pm 0,06$	0,10	$\pm 0,07$

Tab. 3.8 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při zvýšení doby chlazení po dotlaku a plastikaci o 18 s

2c	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	0,03	$\pm 0,01$	0,20	$\pm 0,01$	0,23	$\pm 0,03$	0,16	$\pm 0,11$
2	-0,03	$\pm 0,01$	0,15	$\pm 0,02$	0,16	$\pm 0,04$	0,11	$\pm 0,10$
3	-0,08	$\pm 0,05$	0,18	$\pm 0,06$	0,21	$\pm 0,01$	0,04	$\pm 0,09$

Z tab. 3.6 je zřejmé, že zkrácením doby chlazení proti standardnímu dílu došlo ve všech bodech PX.2 ke zvýšení tvarové odchylky s maximální tvarovou odchylkou v bodě P1.2 až o  $(0,19 \pm 0,01)$  mm. V bodech PX.3 se tvarová odchylka snížila a v bodě P3.3 o maximální hodnotu  $(0,06 \pm 0,06)$  mm. Snížení odchylky pokračuje v bodech PX.4,

kde je rovněž zlepšení stavu oproti odchylkám standardního dílu. Nejvýraznější zlepšení vykazuje bod P3.4 až o  $(0,56 \pm 0,04)$  mm. I když se v místech PX.4 jeví celková odchylka jako pozitivní, je nutné konstatovat, že vzhledem k místu PX.2 je celková tvarová odchylka nerovnoměrná na obou koncích dílu.

Tab. 3.7 je v porovnání s tab. 3.8 téměř identická, proto lze tyto dvě varianty hodnotit společně a k prezentaci výsledků je vybrána varianta 2b (viz tab. 3.7). V bodech PX.2 a PX.3 dochází ke zvětšování tvarové odchylky dílu a to v bodě P2.2 o maximální hodnotu  $(0,21 \pm 0,01)$  mm a v bodě PX.3 o  $(0,24 \pm 0,02)$  mm. Dále má tvarová odchylka klesající průběh, ale stále v porovnání se standardním dílem je celková tvarová odchylka v bodech PX.4 vyšší o hodnotu  $(0,16 \pm 0,03)$  mm. Navíc je z tab. 3.7 a 3.8 zřejmé, že se v ose (body PX.2 a PX.3) dílu projevuje propad konstrukce. Na základě těchto získaných výsledků lze konstatovat, že není důvod přesahovat standardní dobu chlazení

### 3.4.4 Vliv změny doby a velikosti dotlaku na velikost tvarové odchylky v bodech P

V této kapitole jsou uvedené 3 různé varianty změny doby a velikosti dotlaku. V případě varianty 3a došlo pouze ke snížení profilu dotlaku. U varianty 3b došlo ke zvýšení profilu dotlaku spolu se snížením doby dotlaku o 0,2 s a v případě varianty 3c došlo k snížení doby působení dotlaku na pouhých 0,8 s. Všechny tvarové odchylky dílu jsou vztahovány k současnému stavu výroby.

Tab. 3.9 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při snížení profilu dotlaku

3a	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	0,03	$\pm 0,04$	-0,11	$\pm 0,03$	-0,31	$\pm 0,01$	-0,71	$\pm 0,05$
2	0,04	$\pm 0,02$	-0,03	$\pm 0,02$	-0,22	$\pm 0,01$	-0,67	$\pm 0,01$
3	-0,01	$\pm 0,01$	-0,10	$\pm 0,02$	-0,30	$\pm 0,03$	-0,72	$\pm 0,02$

Tab. 3.10 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při zvýšení profilu dotlaku a zkrácení doby jeho působení

3b	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	-0,04	$\pm 0,02$	-0,03	$\pm 0,05$	-0,38	$\pm 0,04$	-1,03	$\pm 0,02$
2	-0,02	$\pm 0,01$	-0,01	$\pm 0,03$	-0,31	$\pm 0,02$	-1,05	$\pm 0,03$
3	-0,03	$\pm 0,01$	-0,01	$\pm 0,01$	-0,36	$\pm 0,02$	-1,10	$\pm 0,04$

Tab. 3.11 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při snížení doby profilu dotlaku

3c	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	0,00	± 0,00	-0,10	± 0,01	-0,46	± 0,06	-1,16	± 0,16
2	0,01	± 0,01	-0,14	± 0,01	-0,47	± 0,05	-1,15	± 0,11
3	-0,03	± 0,01	-0,11	± 0,01	-0,50	± 0,04	-1,24	± 0,05

Při snížení profilu dotlaku (viz tab. 3.9) vykazuje měření zmenšení tvarových odchylek ve všech místech dílu (PX.2 až PX.4). V bodech P2.2 ( $-0,03 \pm 0,02$ ) mm a P2.3 ( $-0,22 \pm 0,01$ ) mm se objevil nepatrný propad konstrukce v porovnání s krajními hodnotami. Zhodnocením celkové tvarové odchylky došlo ke snížení v bodě P3.4 až o ( $0,72 \pm 0,02$ ) mm vzhledem k současnému stavu dílu, proto lze tento stav zhodnotit jako pozitivní výsledek.

Z varianty 3b (viz tab. 3.10) je zřejmý klesající průběh všech tvarových odchylek (PX.1 až PX.4) vzhledem k současnému stavu dílu. Proto lze tento stav brát jako pozitivní výsledek a určujícím místem hodnocení jsou body PX.4. V bodě P1.4 je to zmenšení o ( $1,03 \pm 0,02$ ) mm a v bodě P3.4 je maximální zmenšení odchylky až o ( $1,10 \pm 0,04$ ) mm.

U varianty 3c (viz tab. 3.11) je rovněž klesající průběh tvarových odchylek v bodech PX.2 až PX.4. V porovnání se dvěma předchozími variantami (varianta 3a, 3b) je tento klesající průběh tvarových odchylek nejvýraznější. V bodě P1.4 došlo ke zmenšení o ( $1,16 \pm 0,16$ ) mm, v bodě P2.4 o ( $1,15 \pm 0,11$ ) mm a největší zmenšení tvarové odchylky došlo v bodě P3.4 až o ( $1,24 \pm 0,05$ ) mm.

### 3.4.5 Vliv změny materiálu na velikost tvarové odchylky v bodech P

Tab. 3.12 Tabulka hodnot tvarových odchylek v jednotlivých bodech P při změně materiálu

4a	Odchylka dílu v bodech P [mm]							
X	PX.1	směr. od.	PX.2	směr. od.	PX.3	směr. od.	PX.4	směr. od.
1	-0,02	± 0,01	0,43	± 0,02	0,38	± 0,03	-0,31	± 0,02
2	0,16	± 0,02	0,34	± 0,01	0,36	± 0,01	-0,05	± 0,02
3	0,26	± 0,02	0,43	± 0,01	0,33	± 0,01	0,04	± 0,02

Při změně materiálu z polykarbonátu Xantar 19 UR na Lexan Resin 92 jsou na první pohled viditelné změny ve všech bodech. V ose dílu je viditelné, že se tvarová odchylka bodů P zvětšuje do bodu P3.3 až o  $0,36 \pm 0,01$  mm a v posledním bodě P2.4 naopak odchylka klesá na zápornou hodnotu  $-0,05 \pm 0,02$  mm. Největší tvarovou kladnou odchylku vykazuje bod P1.2 a bod P3.2 až o 0,43 mm a nejmenší zápornou odchylku vykazuje bod P1.4 ( $-0,31 \pm 0,02$  mm). Z tab. 3.12 je patrné, že deformace ve všech místech dílu je velice proměnlivá na rozdíl od standardně vyráběného dílu.

### 3.4.6 Vliv změny teploty temperačního media (formy) na velikost šířky dílu

Tab. 3.13 Tabulka hodnot rozměrů S v různých místech při zvýšení teploty temperačního media tvárníku

Varianta	Šířka dílu [mm]					předepsaný rozměr
	S1	S2	S3	S4	S5	
1a	81,21	81,12	81,12	81,11	81,25	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	směrodatná odchylka
standard	81,16	80,97	81,03	81,00	81,18	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	směrodatná odchylka

Tab. 3.13 vypovídá o tom, že zvýšením této teploty se zvýšily i rozměry šířky dílu (rozměry S) podél celého dílu. Největší rozměry jsou v krajních místech S1 (81,21 mm) a S5 ( $81,25 \pm 0,01$  mm). Jediným rozměrem vyhovujícím toleranci je bod S4.

### 3.4.7 Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku velikost šířky dílu

Tab. 3.14 Tabulka hodnot rozměrů S v různých místech při změně teploty doby chlazení

Varianta	Šířka dílu [mm]					předepsaný rozměr
	S1	S2	S3	S4	S5	
2a	81,17	81,07	81,21	81,13	81,2	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,03$	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	směrodatná odchylka
2b	81,18	81,12	81,29	81,17	81,25	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,05$	směrodatná odchylka
2c	81,22	81,15	81,32	81,16	81,21	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,09$	$\pm 0,05$	$\pm 0,08$	$\pm 0,07$	$\pm 0,06$	směrodatná odchylka
standard	81,16	80,97	81,03	81,00	81,18	$81 \pm 0,1$

	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	<b>směrodatná odchylka</b>
--	------------	------------	------------	------------	------------	----------------------------

Snížení doby chlazení o 9 s má podle tab. 3.14 (varianta 2a) za následek zvýšení všech rozměrů oproti standardnímu stavu dílu a výkresové dokumentaci. Největší tvarovou odchylkou rozměru je rozměr S3 ( $81,21 \pm 0,01$ ) mm. Jako jediným vyhovujícím rozměrem vzhledem k výkresové dokumentaci je rozměr S2. Tato varianta ze všech uvedených změn se jeví jako nejméně výrazná a svými hodnotami se blíží tolerančnímu poli, pokud jsou brány v úvahu směrodatné odchylky měření.

Zvýšení doby chlazení o 9 s (var. 2b) mělo za následek zvětšení všech rozměrů S mimo rozměr S2, který vyhovuje toleranci daného rozměru. Rozměr S3 vykazuje největší zvětšení na hodnotu ( $81,29 \pm 0,02$ ) mm.

Podobně jako tomu bylo u varianty 2b v tab. 3,14, došlo k největšímu zvětšení rozměru S3 v okolí vtokové soustavy na hodnotu ( $81,32 \pm 0,08$ ) mm. Zároveň rozměry S1 a S5 jsou mimo toleranci daného rozměru. Rozměry S2 a S4 splňují toleranci daného rozměru.

### 3.4.8 Vliv změny doby a velikosti dotlaku na velikost šířky dílu

Tab. 3.15 Tabulka hodnot rozměrů S v různých místech při změně doby a velikosti dotlaku

Varianta	Šířka dílu [mm]					předepsaný rozměr
	S1	S2	S3	S4	S5	
3a	81,04	80,78	80,71	80,78	81,05	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,01$	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	<b>směrodatná odchylka</b>
3b	81,22	81,01	81,15	81,05	81,16	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,09$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,00$	<b>směrodatná odchylka</b>
3c	81,01	80,74	80,72	80,72	81,03	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,02$	$\pm 0,00$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	<b>směrodatná odchylka</b>
standard	81,16	80,97	81,03	81,00	81,18	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	<b>směrodatná odchylka</b>

V tab. 3.15 (varianta 3a) krajní hodnoty S1 a S5 splňují toleranci daného rozměru, ale u zbylých hodnot (S2, S3, S4) došlo ke zmenšení rozměru dílu, kde největší hodnota zmenšení rozměru je v bodě S3 na 80,71 mm. Je to dáno zřejmě nízkou velikostí dotlaku, kdy není možné dostatečně kompenzovat velikost smrštění a "dotlačit" taveninu v dostatečné míře.

U varianty 3b (tab. 3.15) v místech S2 a S4 bylo dosaženo splnění tolerance daného rozměru. V bodech S1, S3 a S5 došlo ke zvětšení daných rozměrů. K největšímu



zvětšení došlo u rozměru S1 na  $(81,22 \pm 0,09)$  mm. U rozměru S3 je to  $(81,15 \pm 0,02)$  mm a u rozměru S5 81,16 mm.

Snížení doby trvání fáze dotlaku způsobilo zkrácení cyklu tab. 3.15 (var. 3c). Tak jako v případě snížení dotlaku došlo ke zmenšení rozměrů S3  $(80,72 \pm 0,03)$  mm a S4  $(80,72 \pm 0,02)$  mm mimo bod S2. U rozměru S2 došlo ke zmenšení na rozměr 80,74 mm. Zbylé dva rozměry S1 a S5 splňují tolerance daného rozměru.

### 3.4.9 Vliv změny materiálu na velikost šířky dílu

Tab. 3.16 Tabulka hodnot rozměrů S v různých místech při změně šarže materiálu

Varianta	Šířka dílu [mm]					předepsaný rozměr
	S1	S2	S3	S4	S5	
4a	81,29	81,32	81,44	81,29	81,26	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	směrodatná odchylka
standard	81,16	80,97	81,03	81,00	81,18	$81 \pm 0,1$
	$\pm 0,00$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	směrodatná odchylka

Tab. 3.16 (varianty 4a) znázorňuje změnu materiálu, kde je opět znatelný nevyhovující stav rozměrů. V porovnání se standardním dílem a výkresovou dokumentací je šířka ve všech místech S mimo toleranční pole. Protože byl tento stav nevyhovující i u sledování odchylek průhybu. Lze tedy předpokládat, že ke zlepšení délkových rozměrů nenastane a je možné vyloučit srovnání délkových rozměrů.

### 3.4.10 Vliv změny teploty temperačního media tvárníku na délkové rozměry dílu

Tab. 3.17 Tabulka hodnot rozměrů D při změně

teploty temperačního media na tvárníku

Varianta	Délka dílu [mm]		
	délka dílu	směr. od.	předepsaný rozměr
1a			
D1	223,63	$\pm 0,03$	$223 \pm 0,1$
D2	223,51	$\pm 0,04$	$223 \pm 0,1$
D3	223,64	$\pm 0,03$	$223 \pm 0,1$

Tab. 3.18 Tabulka hodnot rozměrů D standardního dílu

Standard	délka dílu	směr. Od.	předepsaný rozměr
D1	223,59	0,02	$223 \pm 0,1$
D2	223,38	0,03	$223 \pm 0,1$
D3	223,59	0,05	$223 \pm 0,1$

Jelikož je délkový rozměr mimo toleranční pole, je toto porovnání bráno vzhledem k současnému stavu dílu (viz tab. 3.18) i výkresové dokumentaci. Podle tab. 3.17 je zřejmé, že tento vliv zvýšení teploty temperačního media na tvárníku má negativní vliv a ještě více se zvětšují délkové rozměry. Největší hodnotu má krajní rozměr D2  $223,64 \pm 0,03$  mm.

### 3.4.11 Vliv změny doby chlazení po plastikaci a po dotlaku na délkové rozměry dílu

Tab. 3.19 Tabulka hodnot rozměrů D v různých místech při změně doby chlazení

Délka dílu [mm]							
Varianta	2a		2b		2c		předepsaný rozměr
	délka dílu	směr. od.	délka dílu	směr. od.	délka dílu	směr. od.	
D1	223,64	$\pm 0,02$	223,69	$\pm 0,02$	223,75	$\pm 0,04$	$223 \pm 0,1$
D2	223,43	$\pm 0,12$	223,51	$\pm 0,00$	223,41	$\pm 0,01$	$223 \pm 0,1$
D3	223,65	$\pm 0,00$	223,67	$\pm 0,01$	223,78	$\pm 0,02$	$223 \pm 0,1$

Tab. 3.20 Tabulka hodnot rozměrů D standardního dílu

Standard	délka dílu	směr. Od.	předepsaný rozměr
D1	223,59	0,02	$223 \pm 0,1$
D2	223,38	0,03	$223 \pm 0,1$
D3	223,59	0,05	$223 \pm 0,1$

Jako v předešlé kapitole i zde se projeví změny všech parametrů negativně oproti stávajícímu stavu dílu a všechny hodnoty D1, D2, D3 v tab. 3.19 jsou mimo toleranční pole.

Nejméně prokazatelný vliv má snížení času chlazení o 9 s (varianta 2a), kde se změna projevuje v řádech tisícín mm, což na funkci výrobku nebude mít žádný vliv. Jedinou výhodou by z hlediska této nepatrné změny mohlo být zkrácení cyklu.

Taktéž zvýšením doby chlazení o 9 s (varianta 2b) se projeví zvětšením délkových rozměrů. Zde byl naměřen největší rozměr D1 (223,69 mm). Největším zvětšením rozměru porovnáním s tab. 3.20 došlo u rozměru D2 na 223,51 mm.

U varianty 2c (tab. 3.19) došlo k největšímu zvětšení délkových rozměrů v krajních místech dílu. Na rozměru D3 došlo ke zvětšení až na hodnotu  $(223,78 \pm 0,02)$  mm. Rozměr D2 se zvětšil o pouhých 0,03 mm.

### 3.4.12 Vliv změny doby a velikosti dotlaku na délkové rozměry dílu

Tab. 3.21 Tabulka hodnot rozměrů *D* v různých místech při doby a velikosti dotlaku

Délka dílu [mm]							
Varianta	3a		3b		3c		předepsaný rozměr
	délka dílu	směr. od.	délka dílu	směr. od.	délka dílu	směr. od.	
D1	223,10	± 0,02	223,59	± 0,02	223,03	± 0,04	223 ± 0,1
D2	222,82	± 0,12	223,42	± 0,00	222,84	± 0,01	223 ± 0,1
D3	223,09	± 0,00	223,61	± 0,01	223,03	± 0,02	223 ± 0,1

Tab. 3.22 Tabulka hodnot rozměrů *D* standardního dílu

Standard	délka dílu	směr. Od.	předepsaný rozměr
D1	223,59	0,02	223 ± 0,1
D2	223,38	0,03	223 ± 0,1
D3	223,59	0,05	223 ± 0,1

Snížením velikosti dotlaku (viz tab. 3.19) bylo docíleno toho, že výrobek splňuje toleranci daného rozměru u každého z rozměrů *D* (D1, D2, D3). Tohoto výsledku bylo docíleno pouze u této varianty 3a.

Zvýšení profilu dotlaku (varianta 3b) má téměř identické hodnoty, jako byly naměřeny u dílu vyráběného při standardních podmínkách vstřikování. Maximální rozdíl odchylky došlo u rozměru D2 o 0,04 mm vzhledem k současnému stavu dílu.

U varianty 3c (viz tab. 3.21) splňují toleranci daného rozměru rozměry D1 a D3. Rozměr D2 se nachází mimo toleranci rozměru a jeho hodnota činí (222,84 ± 0,01) mm.

## 4 DISKUZE NAMĚŘENÝCH HODNOT

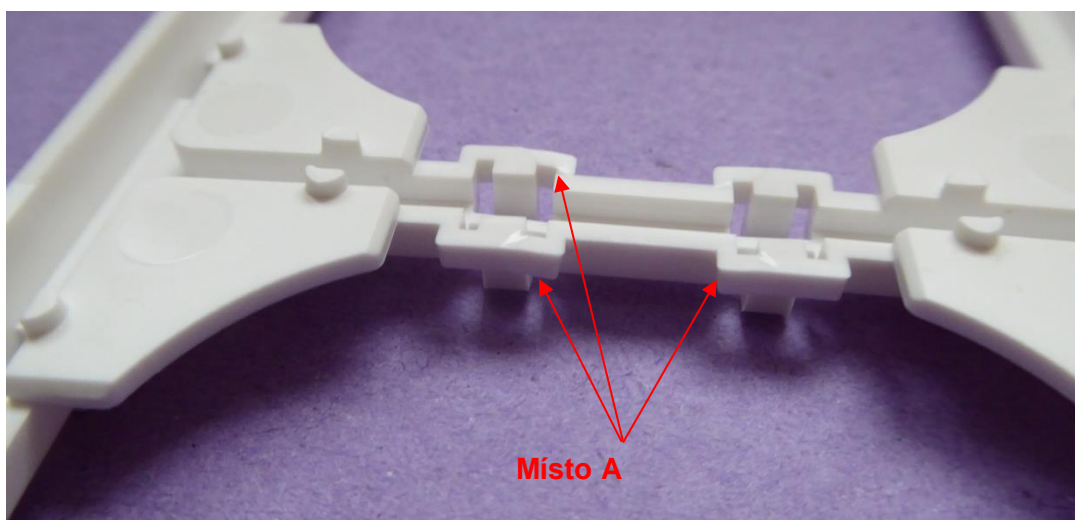
**Var. 1a)** Zvýšením teploty temperačního media v oblast tvárníku formy (pohyblivá část) o 10°C.

Došlo ke zvětšení celkové tvarové odchylky o maximální hodnotu (0,24 ± 0,03) mm v místě P1.4, což je nárůst o 9 %. V místě P3.4 jde o minimální nárůst tvarové odchylky o 3 % (0,08 ± 0,02) mm oproti současnému stavu dílu. Při měření šířky dílu se v každém z měřených bodů rozměr zvětšil oproti standardně lisovanému dílu. Největší nárůst zaznamenal rozměr S2 o 0,19 % a nejmenší nárůst u rozměru S1 o 0,06 %. Jediný rozměr, který zůstal v toleranci je rozměr S4. Taktéž délkové rozměry se zvětšily

v porovnání s dílem vstřikovaným při standardních podmínkách. Jak je již uvedeno v teoretické části (viz kap. 2.3.3.1), s rostoucí teplotou stěny formy roste smrštění, tudíž se rámeček začne smršťovat na teplejší stěnu formy a zřejmě došlo ke zvětšení této odchylky. Lze tvrdit, že touto změnou parametru nedošlo ke zlepšení ani jednoho ze sledovaných rozměrů a odchylky.

**Var. 2a)** Zkrácením doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s (tab.)

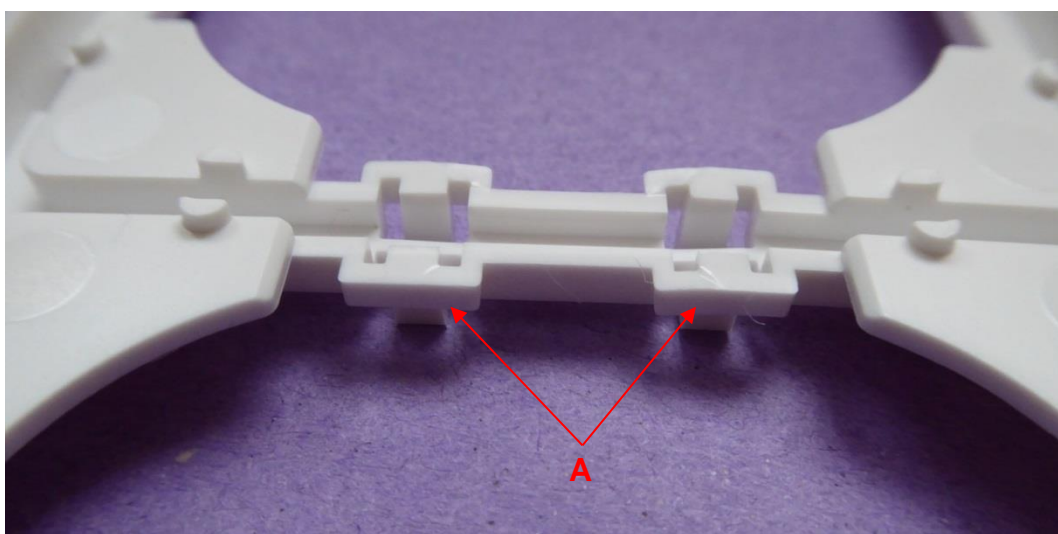
Došlo ke snížení celkové tvarové odchylky o maximální hodnotu ( $0,56 \pm 0,04$ ) mm v místě P3.4, což je pokles o 25 %. V místě P3.4 jde o minimální pokles tvarové odchylky o 18 % 0,46 mm oproti současnému stavu dílu. Tento stav lze hodnotit pozitivně. Při vyhodnocení všech rozměrů šířky došlo ke zvětšení všech rozměrů S1 až S5 vzhledem k současnému stavu dílu. Rozměry šířky S2 a S4 se stále nacházejí v dané toleranci ( $81 \pm 0,1$ ) mm. Zbylé rozměry S1, S3, S4 jsou mimo tolerované pole daného rozměru. Délkové rozměry dílu zůstaly víceméně nezměněny vzhledem k standardnímu dílu, došlo ke zvětšení rozměrů maximálně o 0,06 mm, což lze považovat za zanedbatelnou tvarovou odchylku v porovnání se standardním dílem, ale v porovnání s výkresem součásti je tato odchylka v nejdelším místě D3 o ( $0,55 \pm 0,04$ ) mm mimo toleranci daného rozměru. U této změny parametru se projevila viditelná vada v místech A na obr. 4.1, kde došlo k deformaci dílu. V důsledku vzniku této vady lze konstatovat, že snížení doby chlazení o 9s (zkrácení cyklu) je nevyhovující.



*Obr. 4.1 Vznik viditelné vady v místech A na výrobku v důsledku zkrácení doby chlazení*

**Var. 2b)** Prodloužena doba chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s.

Zde došlo k mírnému zvětšení celkové tvarové odchylky vzhledem současnému stavu dílu o  $(0,16 \pm 0,03)$  mm v bodě P1.4, což je nárůst o 6 %. V nejnižším bodě P3.4 byl nárůst o 4 %. Navíc došlo k nežádoucímu prohnutí (propadu) konstrukce dílu v místech P2.2 a P2.3 dle tab. 3.7. Co se týče šířky dílu (rozměry S), tak oproti standardnímu dílu došlo k navýšení všech rozměrů v rozmezí 0,02 % až 0,33 %. Jediný bod, který vyhovuje toleranci je bod S2. U délkového rozměru nevyhovuje ani jeden z měřených rozměrů, kde nejmenší odchylka od tolerovaného rozměru je v ose součásti D2  $(0,41 \pm 0,05)$  mm. Tato varianta může být vyloučena, protože k žádné optimalizaci nedošlo. Projevila se i tvarová vada v místech A, což nesplňuje kvalitu výrobku obr. 4.2.



*Obr. 4.2 Vznik viditelné vady v místech A na výrobku v důsledku prodloužení teploty chlazení*

**Var. 2c)** Prodloužena doba chlazení po plastikaci a dotlaku o 18 s.

U prodloužení doby chlazení o dalších 9 s se jeví rozměry tvarových odchylek deformací P, šířky S, délky D dílu i stejné deformace v místě A téměř identické s variantou 2b. Mimo jiné, že dojde ke zvýšení doby cyklu. Je tato varianta vyloučena a lze konstatovat, že delší doba jak 29 s oproti variantě 2b už nemá výraznější vliv na výsledné rozměry a tvar výrobku.

**Varianty 2)** Změnou teplot chlazení po dotlaku a plastikaci nedošlo jednoznačně k zlepšení stavu, tudíž nynější doba chlazení 20 s je vyhovující. Předmětem dalšího testování může být, zda je možné tuto dobu chlazení změnit o menší hodnoty než je 9 s a určit, o kolik sekund si bude moci obsluha stroje dovolit změnu tohoto parametru při dosažené příslušné kvality výrobku

**Var. 3a)** Tlak profilu dotlaku snížen na hodnotu 40 MPa po 0,3 s; 30 MPa po 2,5 s; 10 MPa po 0,5 s.

U této varianty došlo k zmenšení celkové tvarové odchylky o maximální hodnotu v bodě PX.4 ( $0,72 \pm 0,03$ ) mm, což je zlepšení stavu o 32 % vzhledem k současnému stavu dílu. V místě P1.4 činí toto nejmenší zlepšení stavu o 27 %. U rozměrů šířky dílu S došlo k snížení všech těchto hodnot. Krajiní rozměry S1 a S5 jsou v tolerančním poli daného rozměru ( $81 \pm 0,1$ ) mm. Hodnoty rozměrů S2, S3, S4 se zmenšili vlivem nízkého dotlaku, na takovou hodnotu, že v nejnižším místě S2 činí tento rozdíl až 0,19 mm (0,24%) oproti tolerovanému rozměru. U délkových rozměrů D1, D2, D3 jsme dosáhli toho, že všechny uvedené rozměry splňují toleranci, což je jediný případ, kde toho bylo docíleno. I když bylo dosaženo pozitivních výsledků, důležitým faktem je, že při takto nízkém tlaku, zůstával výstřik zaklíněn v pevné části formy (tvárnici) při jejím otevření. Předmětem dalšího zkoumání by mohlo být to, o jakou hodnotu bude možné snížit dobu dotlaku tak, aby bylo možné jednoduše výrobek vyjmout pomocí manipulátoru.

**Var. 3b)** Tlak profilu dotlaku zvýšen na hodnotu 120 MPa po 0,3 s; 100 MPa po 2,5 s; 80 MPa po 0,5 s; 10 MPa po 0,5 s.

Nastavením takto extrémně vysokého profilu dotlaku oproti současnému stavu výroby, může dojít k tomu, že vyhazovače formy deformovaly výrobek při vyhazování výrobku formy. Současně byla snížena i doba působení dotlaku o 0,2 s. tudíž tu je změna dvou parametrů současně. Při vyjmutí výrobku nedocházelo k viditelným vadám. U této varianty došlo ke snížení celkové tvarové odchylky o maximální hodnotu ( $1,10 \pm 0,04$ ) mm v místě P3.4, což činí 48 % zlepšení stavu oproti standardnímu výstřiku. V místě P1.4 toto snížení bylo o 39 %, přesto by tento rozdíl snížení tvarové odchylky neměl mít vliv na montáž výrobku. U rozměrů S došlo k nepatrnému zvětšení vzhledem k současnému stavu dílu. Rozměr S3 v oblasti vtokové soustavy se zvýšil na hodnotu ( $81,15 \pm 0,02$ ) mm, což je maximální zvětšení rozměru až o 0,15 %. Ostatní rozměry S vykazují navýšení hodnot maximálně o 0,06 mm. Délkový rozměr je téměř totožný s hodnotami standardního dílu a liší se maximálně o 0,03 mm. Na základě výsledků měření lze u této varianty 3b konstatovat, že jedinou výraznou změnou při zvýšení profilu dotlaku je snížení celkové tvarové odchylky průhybu dílu. Je nutné brát v potaz, že při takovémto zvýšení dotlaku vnášíme do výrobku i velké vnitřní napětí a může nastat změna mechanických vlastností dílu, který může praskat při nižších hodnotách namáhání v porovnání se standardním dílem.

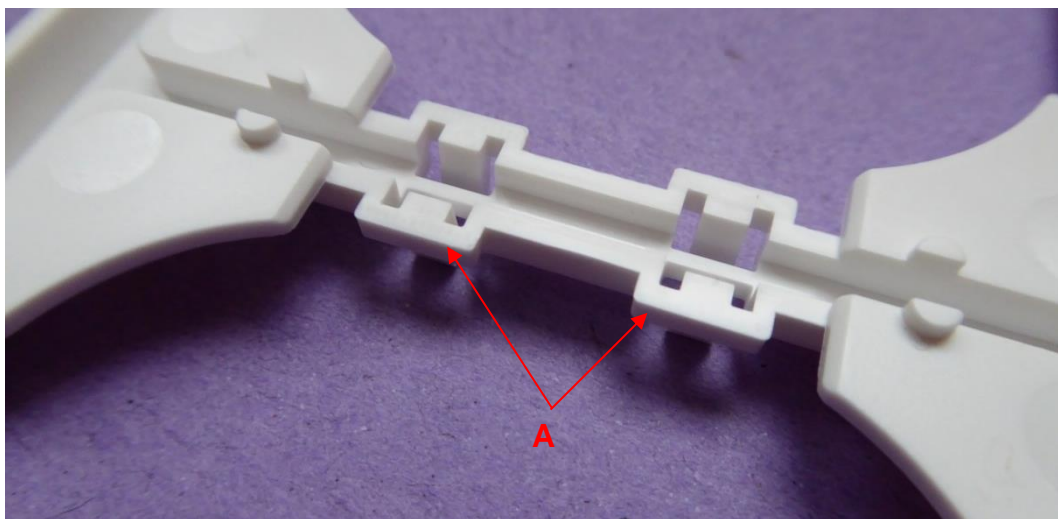


**Var. 3c)** Snížení doby působení dotlaku na hodnotu 60 MPa po 0,2 s; 50 MPa po 0,3 s; 40 MPa po 0,3 s.

Došlo ke snížení celkové tvarové odchylky o maximální hodnotu  $(1,24 \pm 0,05)$  mm

v místě P3.4, což je pokles až o 55 %. V místě P3.4 jde o minimální pokles tvarové odchylky o 44 % mm oproti současnému stavu dílu. Tyto výsledky jsou nejlepším dosaženým výsledkem snížení celkové tvarové odchylky. Rozměry šířky jsou téměř totožné, jako tomu bylo v případě snížení velikosti dotlaku (var. 3a). Krajní rozměry S1 a S5 jsou v tolerovaném poli daného rozměru. Zbylé rozměry S2, S3, S4 jsou mimo tolerované pole daného rozměru. K největšímu rozdílu došlo v u rozměru S3 až o 0,38 % vzhledem k současnému stavu výrobku.

U délkových rozměrů jsou krajní hodnoty D1 a D3 také v mezích tolerance daného rozměru a rozměr D2 se liší vzhledem k výkresové dokumentaci pouze maximálně 0,06 mm. Při snížení doby dotlaku bylo předpokládáno zhoršení rozměrové přesnosti výrobku, protože s rostoucí dobou působení dotlaku by mělo být dosaženo přesnějších rozměrů výrobku. Přesto lze konstatovat, že tato změna parametru z hlediska dosažených výsledků měření vzhledem k výkresové dokumentaci a vzhledem k současnému stavu výroby se jeví jako nejlepší varianta změny vstřikovacího parametru. Na obr. 4.3 je znatelné i dokonalé vystříknutí výrobku v místech A, což lze brát jako velmi pozitivní výsledek.

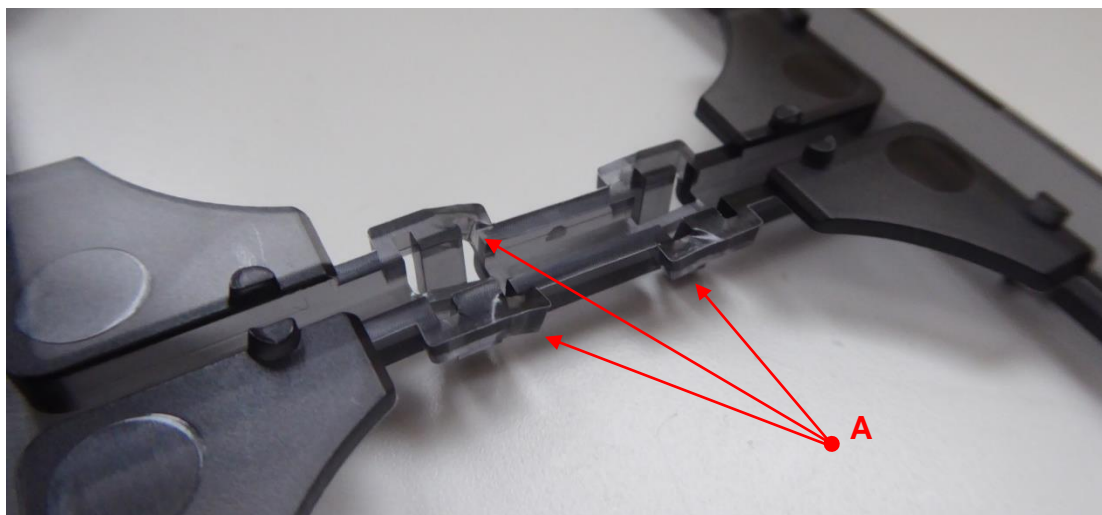


*Obr. 4.3 Dosažená kvalita výrobku změnou vstřikovacího parametru 3c v místech A*

**Varianty 3)** Změnou velikosti a doby dotlaku došlo ke zlepšení rozměrové a tvarové přesnosti, a proto se jeví tyto změny parametrů (parametru 3a, 3b, 3c) jako nejpozitivnější možnost k dosažení požadované kvality výrobku.

**Var. 4a)** Změna materiálu z PC Xantar 19 UR na PC Lexan Resin 92.

Při změně materiálu došlo k nerovnoměrné deformaci ve všech bodech dílu (PX.1 až PX.4), což dokazuje tab. 3.12. Při hodnocení rozměrů šířky S se navíc projevilo zvětšení hodnot od nominální hodnoty o maximální hodnotu  $0,34 \pm 0,02$  mm, což je oproti standardnímu dílu nárůst až o 0,51 %. Na základě tohoto výsledku bylo vyloučeno další měření. Z výsledků měření rozměrové a tvarové přesnosti plyne, že při nelze použít standardní podmínky vstřikování stejného dílu, avšak vyráběného z jiného materiálu, v tomto konkrétním případě vstřikování trojnásobného rámečku. Navíc tento závěr je podpořen vznikem viditelné deformace konstrukce v místech A na obr. 4.4.



*Obr. 4.4 Viditelné vady v místech A v důsledku změny šarže materiálu*



## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla analýza a optimalizace vybraných technologických parametrů ve vztahu k rozměrové a tvarové přesnosti polykarbonátového dílu z produkce firmy ABB Elektro Praga s.r.o. Konkrétně se jednalo o díl trojnásobného rámečku designové řady Levit používaného pro domovní elektroinstalaci.

V teoretické části práce je shrnut základní princip technologie vstřikování. Dále je vysvětlena problematika smrštění termoplastů, jak se smrštění projevuje, a jak je ovlivněno změnou technologických parametrů vstřikování. Z rozboru problematiky vyplývá, že se tyto technologické podmínky vzájemně ovlivňují a proto je zvládnutí smrštění poměrně složité.

V experimentální části je charakterizován výrobek a současný stav výroby. Dále je popsán způsob bezkontaktního měření systému ATOS, prostřednictvím jehož byly vzorky přeneseny do digitalizované podoby a sledovány vybrané rozměrové a tvarové odchylky výstřiku v závislosti na průběhu dotlakové fáze a rychlosti jeho chlazení, resp. teplotě temperačního média formy a době chlazení. Výsledky experimentu jsou přehledně zobrazeny a posuzovány prostřednictvím tabulek (viz kap. 3.4.1 až 3.4.12) v závislosti na změně sledovaných parametrů. Výsledky měření ukázaly, že pokud byl vybraný díl vstřikován za standardních podmínek a došlo pouze ke změně materiálu stejného druhu, tak výrobek vykazoval výraznou tvarovou a rozměrovou nepřesnost. Změnou doby chlazení se u všech variant (var. 2a, 2b, 2c, viz tab. 3.2) projeví na výrobku tvarové a rozměrové nepřesnosti, proto není vhodné tento parametr měnit. Při hodnocení vlivu změny vybraných technologických parametrů byly naopak nejlepší výsledky dosaženy u varianty snížení doby dotlaku (var. 3c, viz tab. 3.2) a varianty, která byla kombinací snížení doby dotlaku a zvýšení jeho velikosti (var. 3b, viz tab. 3.2). V těchto dvou případech bylo oproti současnému stavu výroby dosaženo snížení celkové tvarové odchylky až o 55 % (pro var. 3b), resp. 48 % (pro var. 3c). V případě snížení doby dotlaku bylo zároveň docíleno toho, že u této jediné varianty jsou všechny délkové rozměry "D" (viz obr. 3.14) v toleranci daného rozměru. U rozměrů šířky "S" (viz obr. 3.14) došlo k mírnému poklesu těchto rozměrů vzhledem k výkresové dokumentaci. Z výsledků měření se nabízí možnost snížit tedy dobu dotlaku a zároveň zvýšit jeho velikost. O tom o jak velké tyto hodnoty by měly být, rozhodnou další zkušební testy ve firmě ABB.

Na závěr je nutné dodat, že takto získané výsledky měření platí pouze pro konkrétní formu a díl, a že při změně formy či při vstřikování jednonásobného nebo pětinasobného dílu, které ABB vyrábí, se mohou projevit zcela jiné změny na výrobku. Tato práce je

prvním typem takto provedeného zkušebního měření a lze předpokládat, že v budoucnu by se mohly podobné zkoušky uskutečňovat i na jiných výrobcích změnou jiných parametrů, protože tento způsob měření je prokazatelnou cestou, jak posoudit celkové smrštění dílu a výsledné deformace.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů*.: TU v Liberci 2006, 247 s., ISBN 80-7372-133-2
- [2] KOLOUCH, J.: *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha, STNL, 1986, 229 s.
- [3] MAŇAS, M., VLČEK, J.: *Aplikovaná reologie*. 1. vyd, UTB Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1
- [4] *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2014-12-30]. Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm)
- [5] ZEMAN, L.: *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [6] SOVA, M., KREBS, J. a kol.: *Termoplasty v praxi*. 1. vyd. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. 2 sv. (580, 425 s.). ISBN 80-86229-15-7
- [7] LENFELD, P.: *Technologie II*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 138 s. ISBN 80-737-2037-X.
- [8] *Vliv reziduálních napětí na kvalitu vstřikovaných dílů* [online]. [cit. 2014-24-11]  
Dostupné z:  
<http://www.plasticportal.eu/en/vliv-rezidualnich-napeti-na-kvalitu-vstrikovanych-dilu/c/1713>
- [9] SOBOTKA, J.: *Vstřikování plastů: TECHNOLOGIE II (tváření kovů a plastů)*. [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: [http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP\\_TKP\\_PR\\_10\\_CZE\\_Sobotka\\_Vstrikovani\\_plastu.pdf](http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TKP_PR_10_CZE_Sobotka_Vstrikovani_plastu.pdf)
- [10] HISEM, P.: *Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiku z termoplastů*. Liberec, 2003. Disertační práce. TU v Liberci.
- [11] NEUHÄUSL, E.: *Požadavky na kvalitu a reálné možnosti technologie vstřikování* [online]. [cit. 2014-24-11] Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/pozadavky-na-kvalitu-a-realne-moznosti-technologie-vstrikovani.html>
- [12] ČSN EN ISO 294-4 (640210). *Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů - Část 4: Stanovení smrštění*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 16 s.
- [13] *Shrinkage and warpage* [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z:  
[http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/process/physics/b3500001.htm](http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3500001.htm)
- [14] NEUHÄUSL, E.: *Vady výstřiků – 5. díl Skryté vady (vnitřní pnutí): Výroba / Obrábění* [online]. 2010. vyd. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-5-dil-skryte-vady-vnitri-pnuti.html>

- [15] *Návod na instalaci výrobků ABB s.r.o.*, Elektro-Praga. ABB [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/elektropraga>
- [16] *Konstruktion und kunststoffmaschinen*. [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: [https://www.uni-due.de/kkm/labor\\_en.shtml](https://www.uni-due.de/kkm/labor_en.shtml)
- [17] MICHALISKO, J.: *Využití 3D skenování pro přípravu obrábění odlitků součástí parních turbín*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [18] *Mcae ATOS triplce scan* [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [19] *3D Optical Scanning* [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://www.orsaproje.com/eng/3d-optical-scanning/>

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P1:** Materiálový list PC Xantar 19 UR
- Příloha P2:** Materiálový list PC Lexan 923 1/2 , 2/2
- Příloha P3:** Výkres trojnásobného rámečku 390 H- B310
- Příloha P4:** Barevná mapa standardního dílu
- Příloha P5:** 1a) Barevná mapa při změně teploty temperačního media tvárníku (formy)
- Příloha P6:** 2a) Barevná mapa při snížení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s
- Příloha P7:** 2b) Barevná mapa při prodloužení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s
- Příloha P8:** 2c) Barevná mapa při prodloužení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 18 s
- Příloha P9:** 3a) Barevná mapa při snížení profilu dotlaku
- Příloha P10:** 3b) Barevná mapa při zvýšení profilu dotlaku
- Příloha P11:** 3c) Barevná mapa při snížení doby dotlaku
- Příloha P12:** 4a) Barevná mapa při změně materiálu

## Příloha P1: Materiálový list 1/2

**Xantar 19 UR****PC**

Very low viscosity, UV stabilised. With mould release.

<i>Properties</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical data</i>	<i>Test methods</i>
<b>Physical properties</b>			
Density	g/cm <sup>3</sup>	1,2	ISO 1183
Water absorption - after saturation 23°C	%	0,15	ISO 62
<b>Rheological properties</b>			
Melt volume flow-rate MVR (300)	cm <sup>3</sup> /10min	16	ISO 1133
Limiting viscosity number LVN	ml/gr	46	ISO 1628/4
<b>Mechanical properties</b>			
<b>Tensile test</b>			ISO 527-1
yield stress (at 50 mm/min)	MPa	60	
yield strain (at 50 mm/min)	%	6	
nom. strain at break (at 50 mm/min)	%	>50	
stress at break (at 5 mm/min)	MPa	-	
strain at break (at 5 mm/min)	%	-	
tensile modulus (at 1 mm/min)	MPa	2300	
<b>Flexural test</b>			
flexural modulus	MPa	2400	ISO 178
flexural stress	MPa	90	ISO 178
<b>Impact properties</b>			
Izod impact strength at 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	NB	ISO 180-4AR
Izod impact strength at -30°C	kJ/m <sup>2</sup>	-	ISO 180-4AR
Izod notched impact strength at 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	70	ISO 180-4A
Izod notched impact strength at -30°C	kJ/m <sup>2</sup>	-	ISO 180-4A
<b>Thermal properties</b>			
Vicat softening temperature B/50 at 50N	°C	145	ISO 306
Heat deflection temperature HDT-A	°C	130	ISO 75-1
Coefficient of lin.therm/ expansion - parallel	E-4/K	0,65	DIN 53752
Ball pressure test	°C	125	IEC 60335-1
Relative temperature index - with impact	°C,mm	130, 3.0mm	UL 746B
Relative temperature index - without impact	°C,mm	130, 3.0mm	UL 746B
<b>Flammability properties</b>			
Flammability class UL 94	class(mm)	V-2, 1.5mm	UL 94
Flammability class UL 94 - 5V	class(mm)	-	UL 94
Oxygen index	%	26	ISO 4589-2
Glow wire test		*	
<b>Electrical properties</b>			
Electrical strength	kV/mm	29	IEC 60243-1
Relative permittivity at 100 Hz	-	2,9	IEC 60250
Relative permittivity at 1 MHz	-	2,8	IEC 60250
Dissipation factor at 100 Hz	E-4	6,6	IEC 60250
Dissipation factor at 1 MHz	E-4	92	IEC 60250
Comparative tracking index	V	275	IEC 60112
Volume resistivity	Ohm.cm	1E+16	IEC 60093
Surface resistivity	Ohm	-	IEC 60093

\* Data not applicable

NB No break (ductile fracture)

1) Specimen and processing conditions according to ISO 10350 (Campus®).

Xantar is a registered trademark of DSM



**Příloha P1: Materiálový list PC Xantar 19 UR 2/2****Xantar 19 UR**

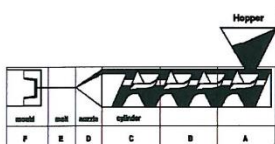
PC

**Characteristics**

General purpose injection moulding grade with very low viscosity. UV stabilised, contains mould release. Excellent temperature resistance, good dimensional stability, good impact. Crystal clear transparency available. UL94 V-2 at 1.5mm.

**Applications**

Parts requiring excellent flow properties, and good mould release with improved stability against UV light.

**Processing guidelines**

The recommended processing parameters are:  
 from hopper to nozzle (A->D)  
 270-280-290-280 °C  
 melt temp. (E) 280-320 °C  
 mould temp. (F) 80-120°C  
 Keep injection speed medium to high and back pressure moderate.

**Shrinkage**

The shrinkage of a moulded article largely depends on its wall thickness, the mould gating and the moulding conditions. Therefore the figures below can only serve as an indication. The mould shrinkage is 0.5-0.7%

**Moisture**

Like all polycarbonate, Xantar absorbs moisture from ambient air. The moisture content of the granulate should be kept below 0.03% prior to moulding. For the drying use a hot air oven (4-5 hours at 120°C) or a vacuum oven (min. 2.5 hours at 120°C). Avoid moisture pick-up prior to processing. Insufficient drying will lead to hydrolytical degradation resulting in surface defects like streaks, but even a severe loss of mechanical properties is possible.

**Packaging/Colours**

The material is available in: transparent, translucent and opaque colours.

**Sales offices****United Kingdom (Redditch)**

Tel. +44 (01527) 59 05 90

Fax. +44 (01527) 59 05 55

**Belgium and Luxembourg (Brussels, B)**

Tel. +32 (02) 712 0530

Fax. +32 (02) 712 0555

**Germany (Düsseldorf)**

Tel. +49 (0211) 4557 600

Fax. +49 (0211) 4557 999

**Sweden (Gräbo)**

Tel. +46 (0302) 46 370

Fax. +46 (0302) 46 365

**France (Paris la Défense)**

Tel. +33 (1) 41 25 05 05

Fax. +33 (1) 47 76 01 00

**Spain (Sant Just Desvern)**

Tel. +34 (93) 470 3030

Fax. +34 (93) 473 6373

**Italy (Como)**

Tel. +39 (0) 31 236 700

Fax. +39 (0) 31 510 716

**United States (Evansville, IN)**

Tel. +1 (812) 435 75 00

Fax. +1 (812) 435 77 12

**Southeast Asia (Singapore)**

Tel. +65 299 6080

Fax. +65 294 3808

**All other countries (Sittard, NL)**

Tel. +31 (0) 46 47 73796

Fax. +31 (0) 46 47 73232

All information supplied by or on behalf of DSM in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and believed reliable, but DSM assumes no liability whatsoever in respect of the application, processing or use made of the aforementioned information or products, or any consequence thereof. The User undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, whose quality and other properties he shall verify, or any consequences thereof. No liability whatsoever shall attach to DSM for any infringement of the rights owned or controlled by a third party in intellectual, industrial or other property by reason of the application, processing or use of the aforementioned information or products by the user.

Edition 0103

©DSM Engineering Plastics

(Printed in the Netherlands)

**DSM**

## Příloha P2: Materiálový list PC Lexan 923

SABIC  
Innovative  
Plastics™



## Lexan® Resin 923

## Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL

LEXAN 923 is a low viscosity flame retardant, UV-stabilized grade, especially suitable for electrical applications.

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	UNIT	STANDARD
<b>MECHANICAL</b>			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	10	mg/1000cy	SABIC Method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	63	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	60	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	6	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	85	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2350	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Hardness, H358/30	95	MPa	ISO 2039-1
Hardness, Rockwell R	118	-	ISO 2039-2
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, unnotched 80*10*3 +23°C	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80*10*3 -30°C	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80*10*3 +23°C	60	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80*10*3 -30°C	10	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	60	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	11	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy Impact, notched, 23°C	25	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/2C
<b>THERMAL</b>			
Thermal Conductivity	0.2	W/m-°C	ISO 8302
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	140	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	141	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120*10*4 sp=100mm	133	°C	ISO 75/Be

<sup>1</sup>) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colours. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume rate are measured on injection moulded samples. All samples are prepared according to ISO 294.

<sup>2</sup>) Only typical data for material selection purpose. Not to be used for part or tool design.  
<sup>3</sup>) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.  
<sup>4</sup>) Own measurement according to UL.  
<sup>5</sup>) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

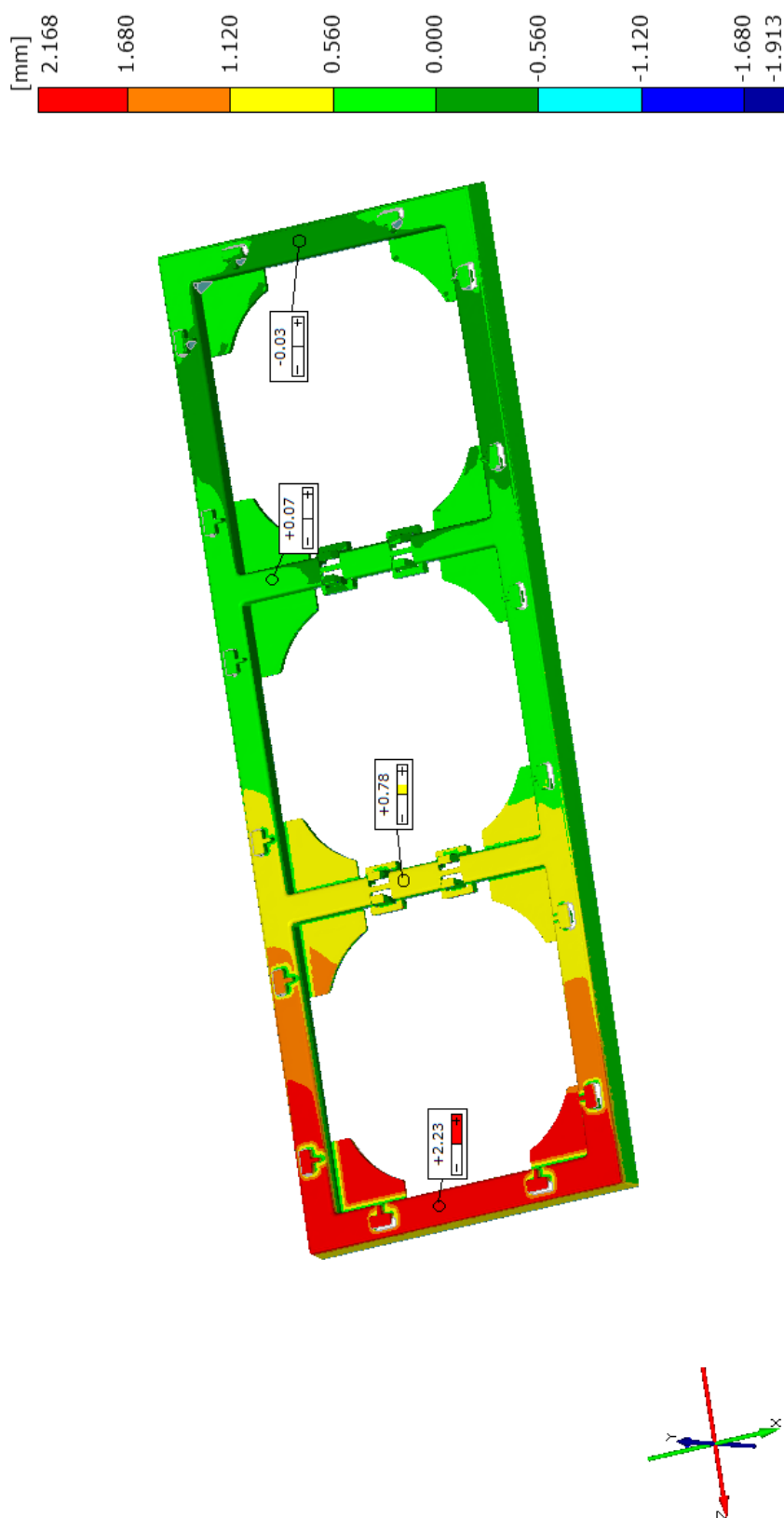
Source, GMD, Last Update:

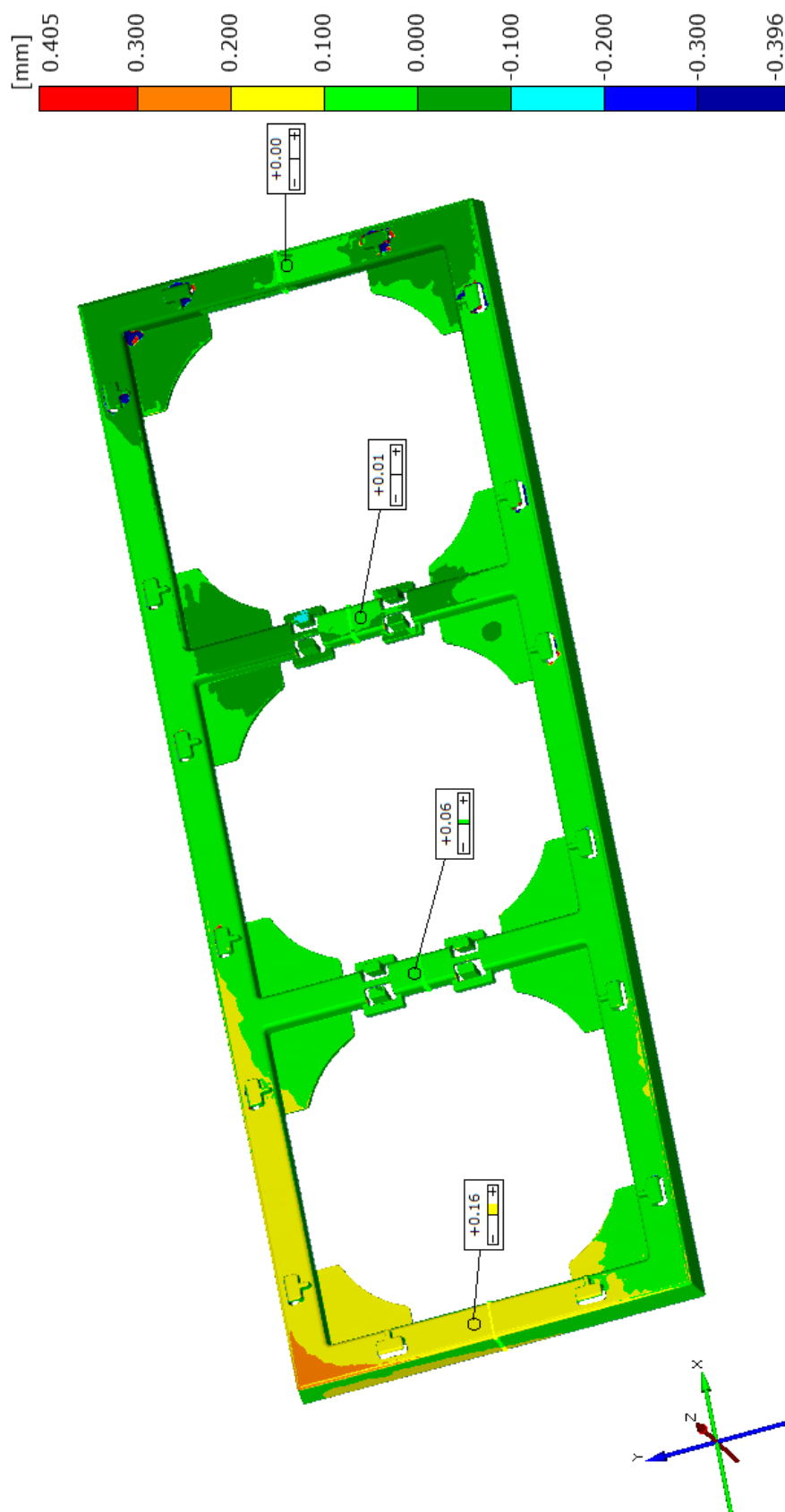
PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA. All information, recommendation or advice given by SABIC Innovative Plastics Company, or any of its subsidiaries, affiliates or authorized representatives, whether written or oral, is given in good faith, to the best of its knowledge and based on current procedures in effect. Each user of the products shall convince himself, through all available sources (including finished product testing in its appropriate environment) of the suitability of the products supplied for its own particular purpose. Because actual use of the products by the user is beyond the control of SABIC Innovative Plastics Company, its subsidiaries and affiliates, such use is in the exclusive responsibility of the user. SABIC Innovative Plastics Company, its subsidiaries and affiliates cannot be held responsible respectively liable for any loss incurred through incorrect or faulty use of the products. Information, recommendations and/or advice are neither made to infringe on any patents, nor to grant a license under any patent or intellectual property right of SABIC Innovative Plastics Company or any of its subsidiaries or affiliated companies, nor to grant the right to file for any patent protection.

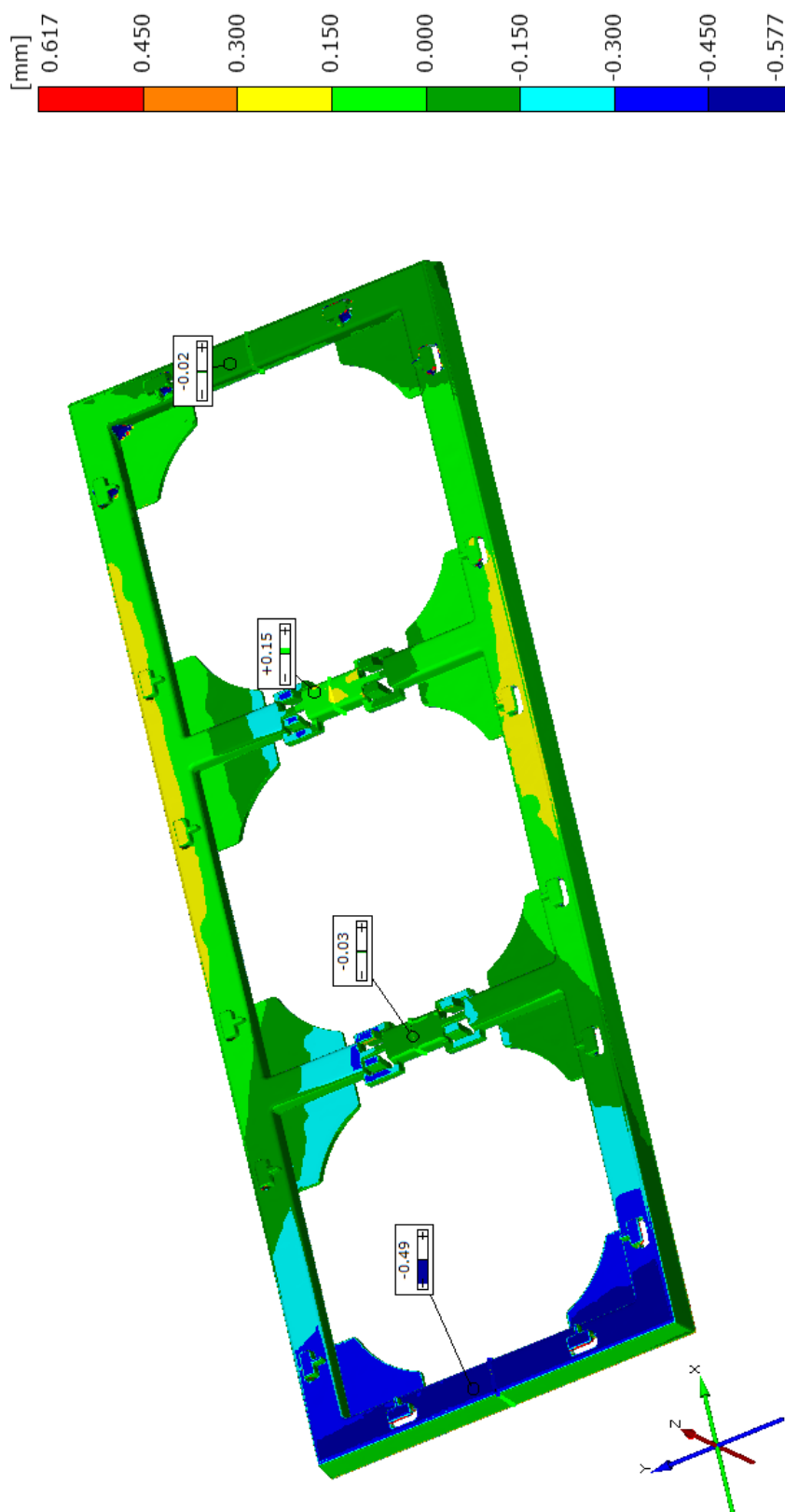
\* Lexan is a trademark of the SABIC Innovative Plastics Company.  
 © 1997-2011 SABIC Innovative Plastics Company. All rights reserved.



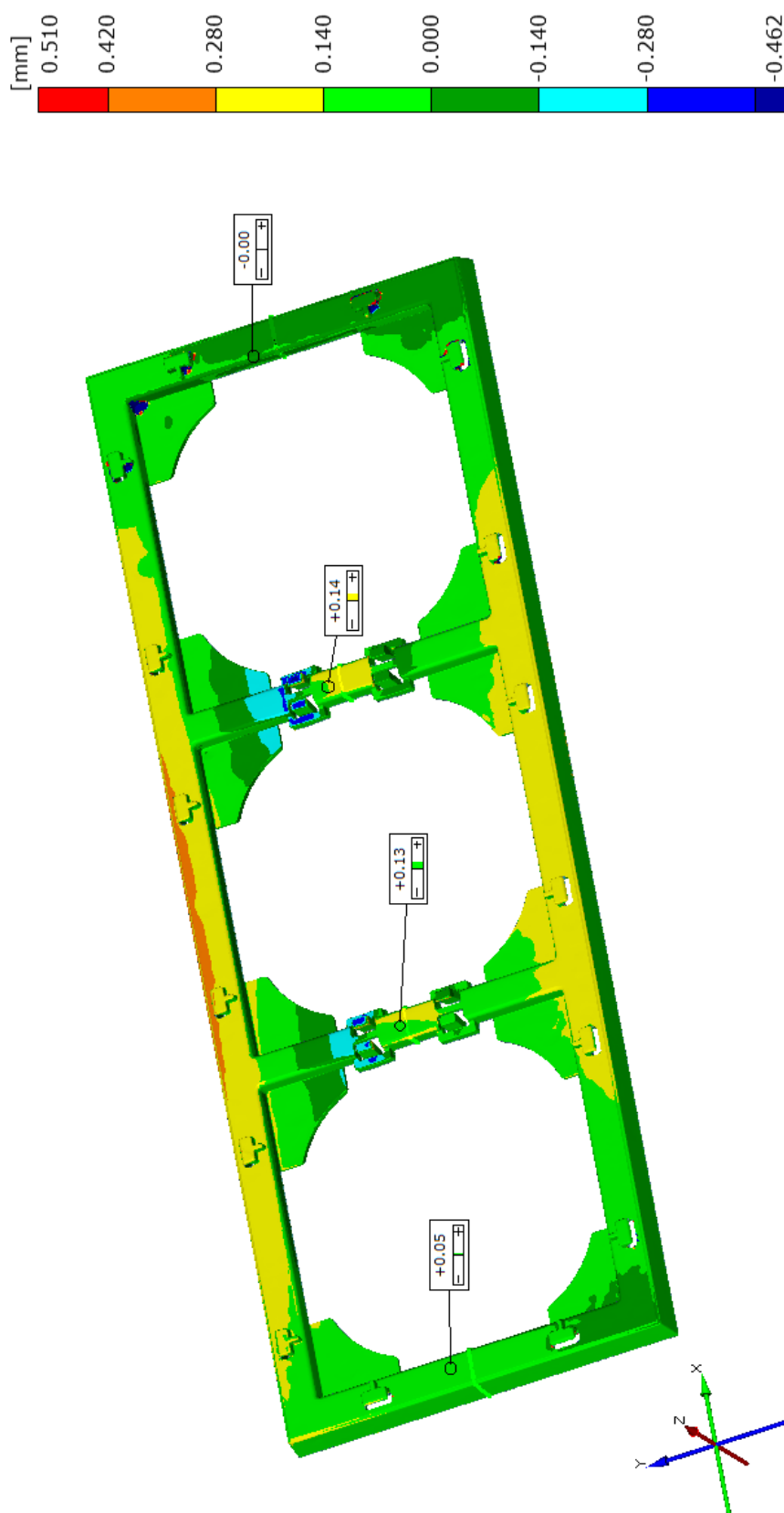


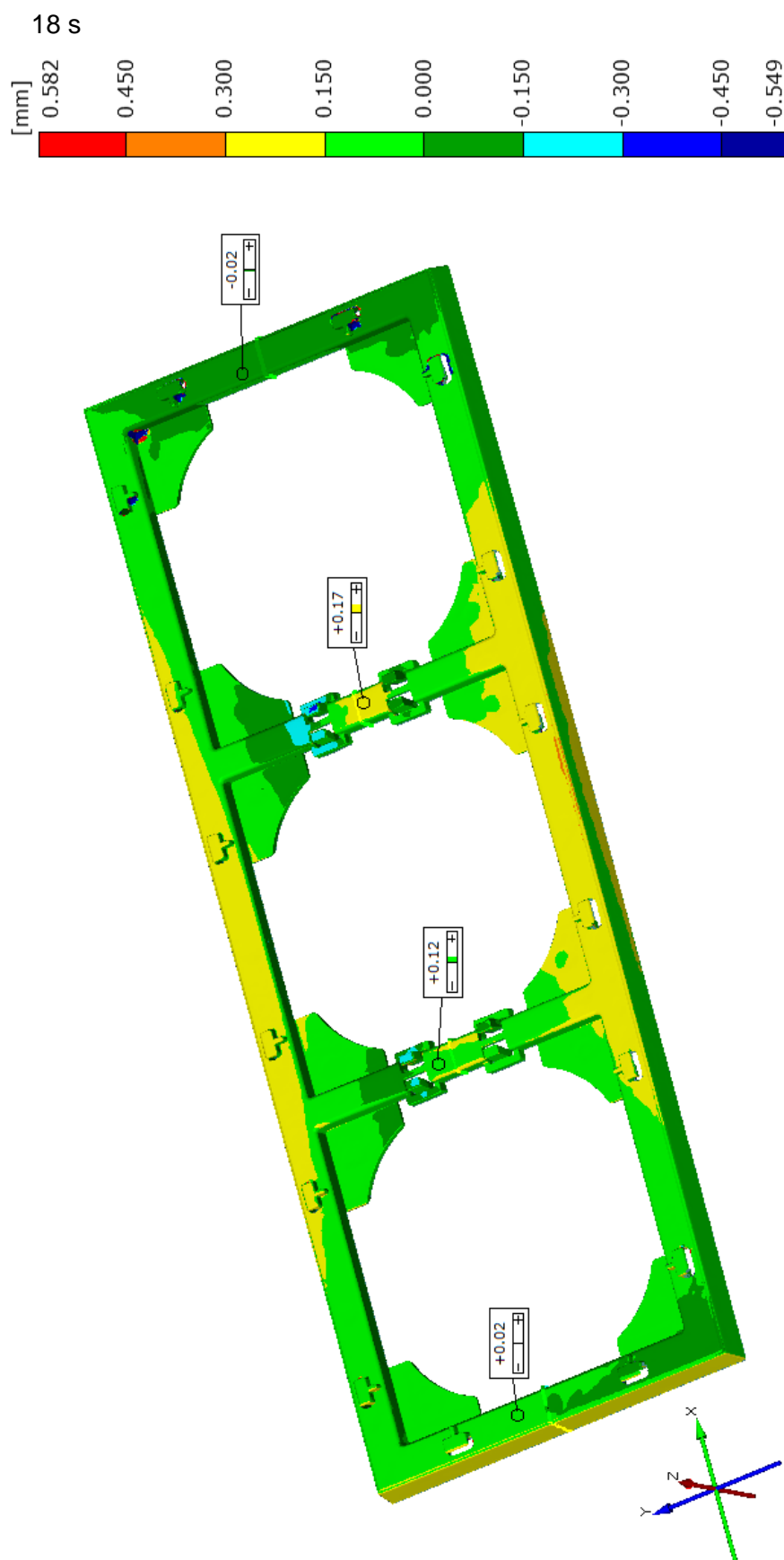
**Příloha P4:** Barevná mapa standardního dílu

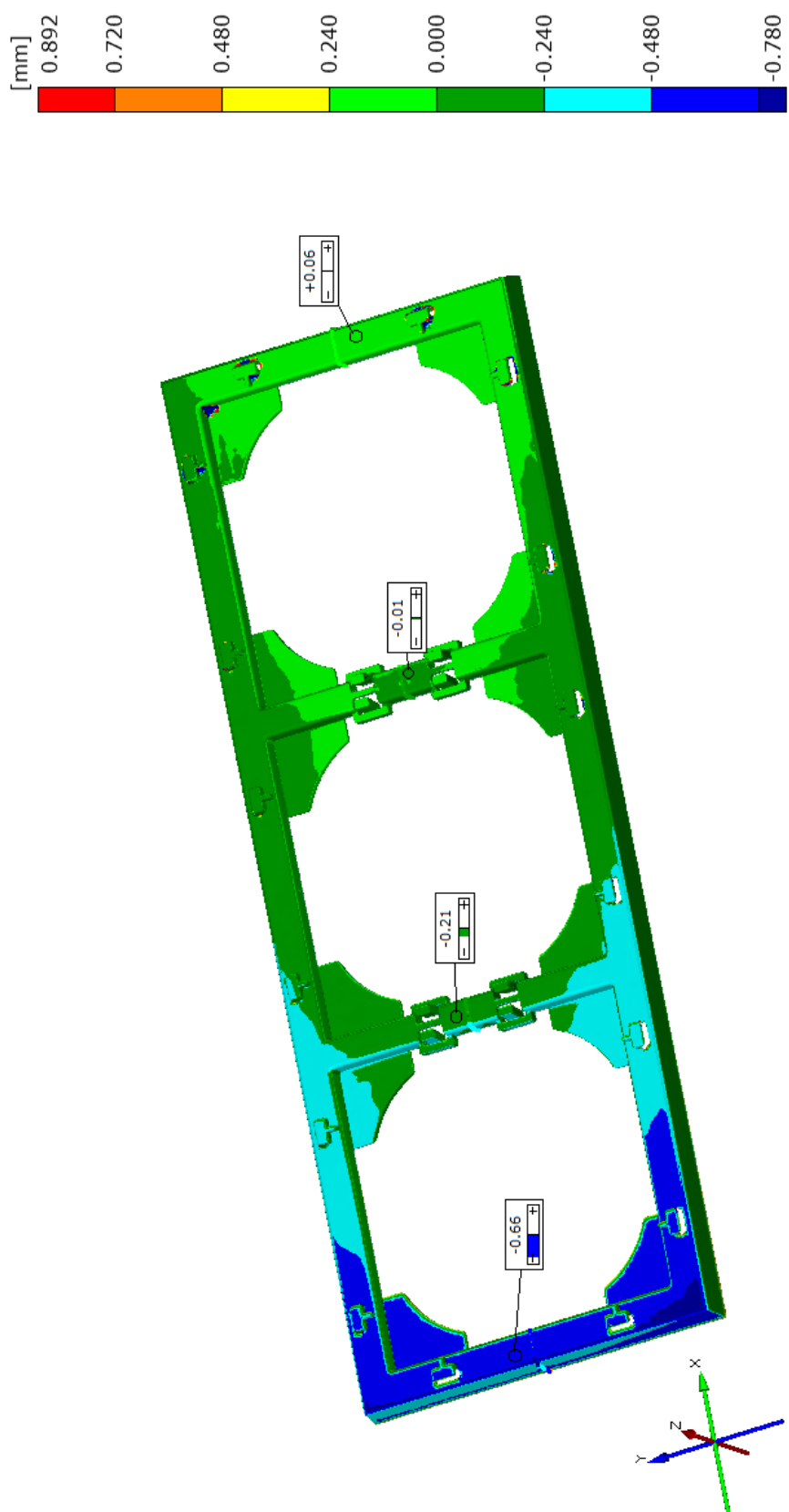
**Příloha P5:** 1a) Barevná mapa při změně teploty temperačního media tvárníku (formy)

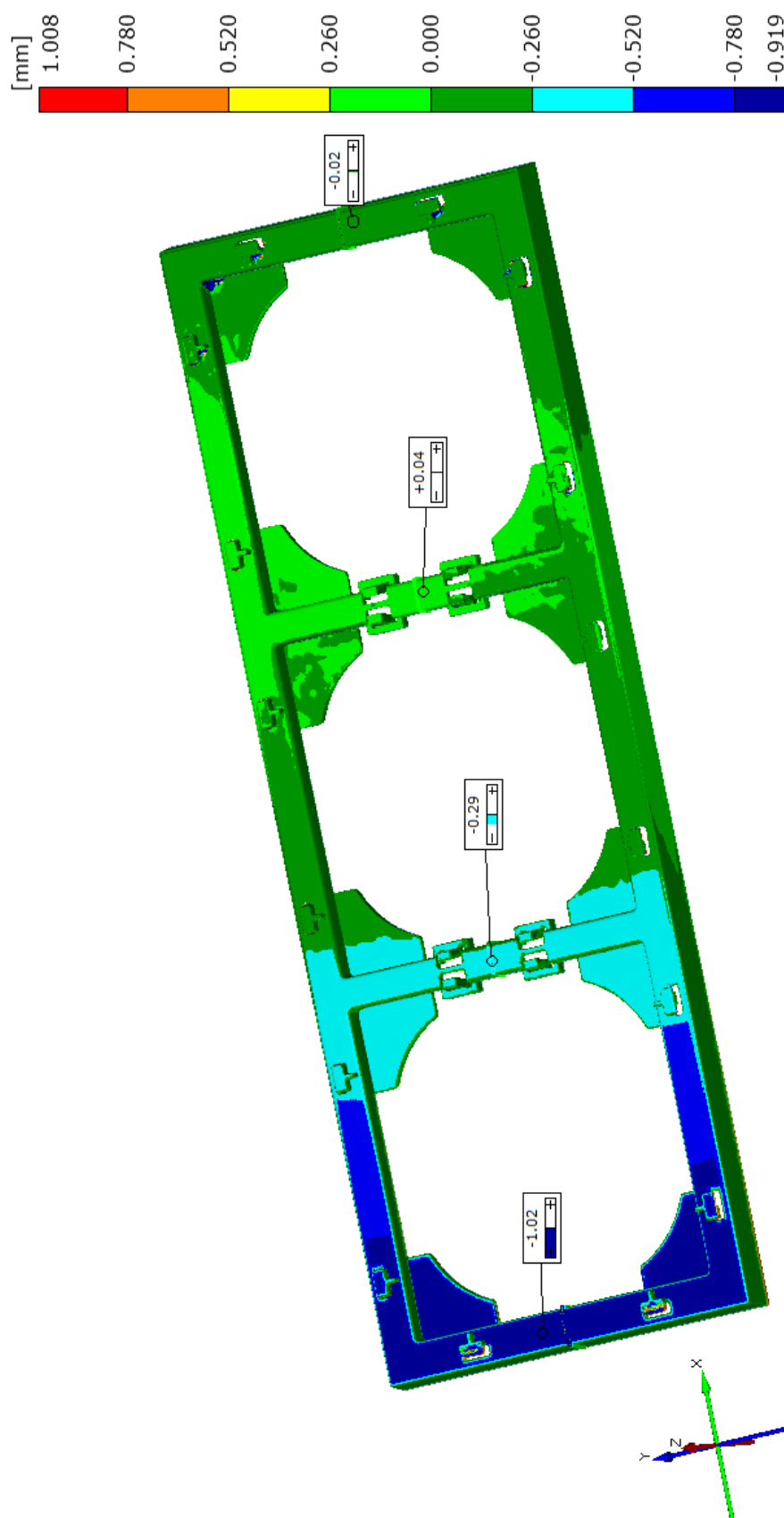
**Příloha P6:** 2a) Barevná mapa při snížení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s

**Příloha P7:** 2b) Barevná mapa při prodloužení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o 9 s

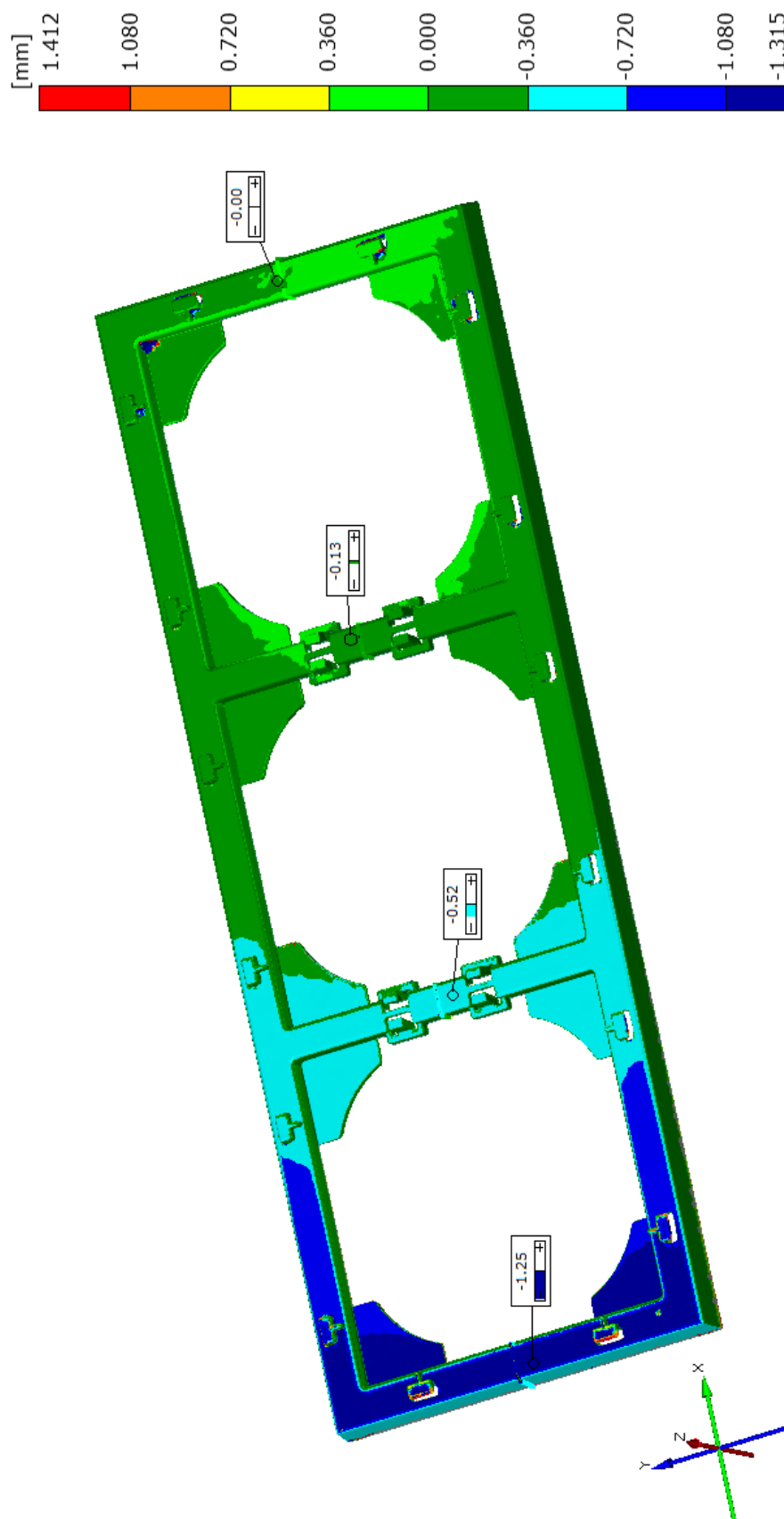


**Příloha P8:** 2c) Barevná mapa při prodloužení doby chlazení po plastikaci a dotlaku o

**Příloha P9:** 3a) Barevná mapa při snížení profilu dotlaku

**Příloha P10:** 3b) Barevná mapa při zvýšení profilu dotlaku



**Příloha P11:** 3c) Barevná mapa při snížení doby dotlaku

**Příloha P12:** 4a) Barevná mapa při změně materiálu